

"TRAGVERHALTEN VON AUFLAGERN IM STAHLBETONFERTIGTEILBAU
BEI VERDREHUNG UND VERSCHIEBUNG DER AUFLIEGENDEN FERTIGTEILE"

A B S C H L U S S B E R I C H T
ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

BERICHT ERSTATTET VON
O. PROF. DR.-ING. K. ^{Karl}KORDINA
DIPL.-ING. H.-H. OSTEROTH

JUNI 1983



DAS FORSCHUNGSVORHABEN WURDE IM AUFTRAGE DES BUNDESMINISTERIUMS
FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU, BONN - BAD GODESBERG,
DURCHGEFÜHRT (AZ.: B15-80 0180-22)

624.013
624.012.45
624.046

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Bezeichnungen	
1. ALLGEMEINES	1
2. LITERATURAUSWERTUNG	3
3. VERSUCHSEINRICHTUNG	7
4. UNTERSUCHTE ELASTOMERLAGER	12
4.1 Unbewehrte Elastomerlager	12
4.2 Bewehrte Elastomerlager	13
5. VERSUCHSPROGRAMM	13
6. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	15
7. AUSWERTUNG DER MESSDATEN	20
8. DARSTELLUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE	22
9. AUSWERTUNG DER VERSUCHE AN UNBEWEHRTEN ELASTOMERLAGERN UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	24
9.1 Ergebnisse der Serie 1, Einfluß erhöhter Pressungen auf das Verformungsverhalten	24
9.1.1 Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz}	26
9.1.2 Horizontalverschiebungen w	32
9.1.3 Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft	33
9.2 Ergebnisse der Serie 2, Einfluß unterschiedlicher Kontaktflächenrauigkeit auf das Trag- und Verfor- mungsverhalten	34
9.2.1 Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz}	36
9.2.2 Horizontalverschiebungen w	39
9.2.3 Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft	41

9.3	Ergebnisse der Serie 3, Einfluß gleichzeitiger Vertikal- und Horizontallastbeanspruchung	42
9.3.1	Horizontalverschiebungen w und aufnehmbare Zwangsbeanspruchungen	43
9.3.2	Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz} und Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft	46
9.4	Ergebnisse der Serie 4, Langzeitverhalten	47
9.5	Versuchsergebnisse der Serie 5, Mehrfachbelastung	51
9.6	Versuchsergebnisse der Serie 6, Mehrfachverdrehung	53
9.7	Versuchsergebnisse der Serie 7, Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchung	56
10.	VORSCHLÄGE ZUR BEMESSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR DIE KONSTRUKTIONSPRAXIS UNBEWEHRTER, LOSE VERLEGTER ELASTOMERLAGER	59
10.1	Zulässigkeit höherer Lagerpressungen	59
10.2	Lagerstauchungen unter zentrischer und exzentrischer Vertikalbelastung	61
10.3	Exzentrizität e der Vertikallast bei Winkelverdrehungen	63
10.4	Horizontalverschiebung w und aufnehmbare Horizontalkraft H	64
11.	AUSWERTUNG DER VERSUCHE AN BEWEHRTEN ELASTOMERLAGERN UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	67
11.1	Ergebnisse der Serie 8	67
11.1.1	Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz}	67
11.1.2	Horizontalverschiebungen w	70
11.1.3	Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft	71
11.2	Ergebnisse der Serie 9, Einfluß gleichzeitiger Vertikal- und Horizontallastbeanspruchung	74
11.2.1	Horizontalverschiebungen w und aufnehmbare Zwangsbeanspruchungen	74
11.2.2	Lagerstauchung f_{zen} und Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft	77
11.3	Ergebnisse der Serie 10, Langzeitverhalten	78
11.4	Versuchsergebnisse der Serie 11, Mehrfachverdrehung	81
11.5	Versuchsergebnisse der Serie 12, Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchung	83

	<u>Seite</u>
12. VORLÄGE ZUR BEMESSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN FÜR KONSTRUKTIONSPRAXIS BEWEHRTER, LOSE VERLEGTER ASTOMERLAGER	86
12 Lagerstauchungen unter zentrischer und exzentrischer Vertikalbelastung	86
Exzentrizität e der Vertikallast bei Winkelverdrehungen	87
Horizontalverschiebung w und aufnehmbare Horizontalkraft H	88
3. ZUSAMMENFASSUNG	90

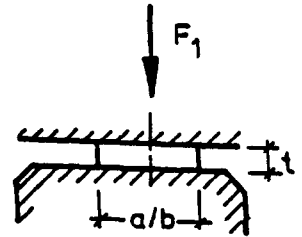
Literaturverzeichnis

Anhang A: Tabellen A 1 - A 26
 Bilder A 1 - A 289

Bezeichnungen

1. Lager im unverformten Zustand:

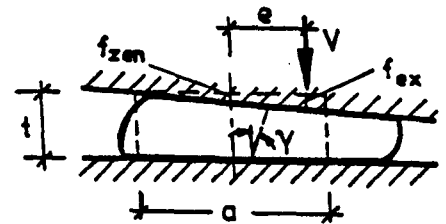
- a = Kantenlänge in Längsrichtung (d.h. in Tragrichtung des aufliegenden Bauteils)
- b = Kantenlänge in Querrichtung
- d = Einbaudicke bewehrter Lager
- t = Lagerdicke, Nenndicke bei unbewehrten Lagern und Elastomerschichtdicke bei bewehrten Lagern
- T = gesamte Elastomerdicke bei bewehrten Lagern
- n = Anzahl der Elastomerschichten bewehrter Lager



$$S = \text{Formfaktor} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot t \cdot (a + b)}$$

2. Lager im verformten Zustand:

- ϵ = Dehnung senkrecht zur Auflagerfläche
- f = $\epsilon \cdot t$ = Dickenänderung des Lagers
- f_{zen} = $f_{\text{zentrisch}}$ = f gemessen in der Achse des Lagers im unverformten Zustand
- f_{exz} = $f_{\text{exzentrisch}}$ = f gemessen in der Achse der exzentrisch angreifenden Vertikalbelastung
- γ = Winkel der Verzerrung unter Horizontalbelastung
- u = $\gamma \cdot t$
- v = Gleitbewegung unter Horizontalbelastung
- w = $u + v$
- $\Delta a, \Delta b$ = Vergrößerung der Kantenlänge a bzw. b gemessen in den Lagerachsen der Auflagerfläche



3. Belastungen

- F_1 = Pressenkraft der Vertikalpresse 1
- F_2 = Pressenkraft der Horizontalpresse 2
- F_3 = Kraft der Pendelstütze
- F_4 = Eigengewicht der Belastungskonstruktion
- V = Vertikalbelastung ($F_1 + F_3 / F_4$)
- H = Horizontalbelastung ($= F_2$)
- e = Exzentrizität der Vertikallast V, bezogen auf die Achse des Lagers im unverformten Zustand
- M = Rückstellmoment ($= V \cdot e$)

4. Spannungen

- σ_m = mittlere Lagerpressung ($= V/a \cdot b$)
 $\sigma_{m,1}$ = σ_m -Anteil nur aus F_1 ($= F_1/a \cdot b$)
 τ = mittlere Lagerschubspannung ($= H/a \cdot b$)

5. Verschiebungen und Verdrehungen des aufliegenden Bauteils gegenüber dem unterstützenden Bauteil (vgl. Bild 12 und 13, S. 25)

- $s_1 - s_8$ = auf Nullablesungen bezogene Wegmessungen
1 bis 8 der Versuchseinrichtung
 f_{zen} = Vertikalverschiebung (= Dickenänderung des Lagers,
gemessen in der Lagerachse)
 w = Horizontalverschiebung (bei schubfester Verbindung in den
Kontaktflächen: $w = u$)
 α = Verdrehungswinkel
 α_k = Verdrehungswinkel, bei dem die Lagerfugen zu klaffen beginnen

6. Statistik

- n = Anzahl der berücksichtigten Werte
 x_i = Meßwert

x_m = Mittelwert: $x_m = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$

- \bar{x}_i = Schätzwert zu x_i

- s = Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_m)^2} \text{ bzw. } = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}$$

Die hier nicht aufgeführten Bezeichnungen werden im Text erläutert.

1. Allgemeines

Für Auflagerungen biegebeanspruchter Stahlbetonfertigteile werden seit einigen Jahren sowohl im Wohnungsbau wie auch im Industriebau in zunehmendem Maße Elastomerlager verwendet. Die vorliegende Arbeit soll zur Verbesserung der Konstruktionspraxis solcher Auflagerungen beitragen, indem auf experimentellem Wege Lösungen zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens erarbeitet und daraus Vorschläge für die baupraktische Anwendung von Elastomerlagern unterbreitet werden.

Die hierzu durchgeführten Versuche stellen eine Fortführung des im Jahre 1979 abgeschlossenen Forschungsvorhabens "Tragverhalten von Auflagern im Stahlbetonfertigteiltbau bei Verdrehung und Verschiebung der aufliegenden Fertigteile" dar, das ebenfalls im Auftrage des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godesberg, am Institut für Baustoffe, Masivbau und Brandschutz der TU Braunschweig durchgeführt wurde /1, 24/.

Elastomerlager werden im Fertigteiltbau sowohl in unbewehrter wie auch in bewehrter Ausführung verwendet. Die durchgeführten Versuche wurden dementsprechend in zwei Gruppen aufgeteilt:

1. Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten unbewehrter Elastomerlager.

Ergänzend zu den in /1/ beschriebenen Versuchen sollte hier die Bedeutung folgender Parameter untersucht werden:

- Einfluß hoher Pressungen
- Einfluß der Rauigkeit der angrenzenden Bauteiloberfläche
- Einfluß zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung
- Langzeitverhalten
- Einfluß von Mehrfachverdrehungen und -belastungen
- Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchungen

2. Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten bewehrter Elastomerlager.

Wie bei den Versuchen an unbewehrten Lagern wurden auch hier folgende Parameter untersucht:

- Einfluß zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung
- Langzeitverhalten
- Einfluß von Mehrfachverdrehungen
- Einfluß der zeitlichen Reihenfolge der Beanspruchungen

Hingegen erübrigten sich Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Oberflächenrauigkeiten, da bei den bewehrten Lagern das Zusammenwirken zwischen den äußeren Elastomerschichten und den Oberflächen der angrenzenden Bauteile für das Trag- und Verformungsverhalten ohne große Bedeutung und lediglich für die Beurteilung der Gleitsicherheit von Auflagerungen mit bewehrten Lagern von Interesse ist. Hierzu liegen bereits ausreichende Kenntnisse vor /40/.

Für Versuche unter hohen Lagerpressungen standen hydraulische Druckpressen mit einer Kapazität von 1000 kN zur Verfügung.

Folgende Größen wurden bei allen Versuchen gemessen:

- Exzentrizität e der Druckresultierenden bei Verdrehungen des aufliegenden Bauteils bzw. bei zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung,
- Stauchungen in der Lagerachse (f_{zen}) und in der Achse der Druckresultierenden (f_{exz}),
- horizontale Relativverschiebungen (w) der angrenzenden Bauteile.

2. Literaturlauswertung

Eine umfangreiche Auswertung und Beschreibung der Literatur über bewehrte und unbewehrte Elastomerlager ist im Abschlußbericht /1/ des vorangegangenen Forschungsvorhabens enthalten. Auf eine erneute vollständige Literaturlauswertung wird im Rahmen dieses Berichts daher verzichtet; hier sei lediglich auf einige Arbeiten hingewiesen, die nach 1979 entstanden sind und deshalb in /1/ noch keine Berücksichtigung finden konnten.

Müller, Sasse und Thormählen berichten in Heft 339 des 'DAfStb /33/ über Druckversuche an stützenfußähnlich ausgebildeten Stahlbetonkörpern, die auf unbewehrte Elastomerlager lose aufgelegt waren. Die infolge der Elastomerauflagerung in den Endbereichen der Stützen auftretenden Quer-Zugkräfte wurden untersucht. Dabei wurde eine maximale mittlere Druckspannung von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$, bezogen auf die Lagerfläche, nicht überschritten.

Ausgehend von der in Bild 1 dargestellten Betondruckspannungsverteilung in der Kontaktfläche zwischen Lager und Bauteil geben die Autoren als Ergebnis ihrer Untersuchungen Rechenansätze an, mit denen die Spaltzugkraft Z_s bei mittiger und ausmittiger Beanspruchung sowie die in der Kontaktfläche zwischen Lager und Bauteil bei mittiger Beanspruchung wirkende Quersugkraft Z_t bestimmt werden können. Bei der Bestimmung der unter ausmittiger Beanspruchung auftretenden Abreißzugkraft Z_R wird auf eine bereits in /28/ entwickelte Beziehung zurückgegriffen. Die Lage der resultierenden Kräfte wird mit $z = 0,6 \cdot b$ vom Stützenende entfernt für die Spaltzugkraft und mit $z = 0,1 \cdot b$ vom Stützenende entfernt für die Abreißzugkraft angegeben. Aufgrund der ermittelten Zugkräfte werden ein Bemessungsverfahren und Empfehlungen für die Bewehrungsanordnung im Bereich der Stützenenden angegeben.

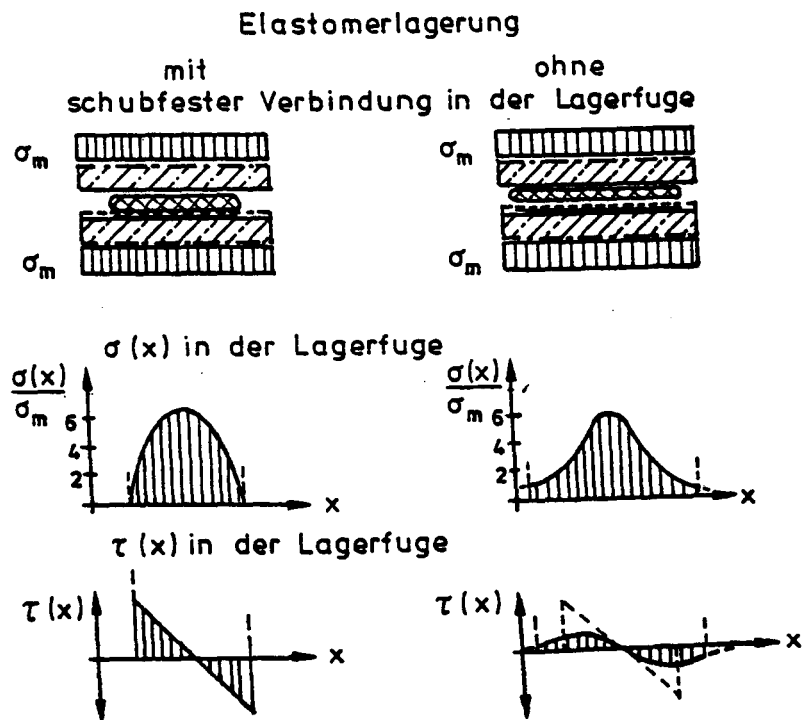


Bild 1: Druck- und Schubspannungsverteilung in der Kontaktfläche nach /33/

Das zeitabhängige Verformungsverhalten und die Temperaturabhängigkeit elastomerer Werkstoffe wurden in /1/ bereits ausführlich behandelt. Da hierzu zwei neuere Arbeiten von Müller /30, 31/ vorliegen und zwischen dem in /1/ überwiegend verwendeten Werkstoff CR und dem jetzt bei den unbewehrten Lagern untersuchten Elastomer EPDM Unterschiede bestehen, werden hier die wichtigsten Zusammenhänge erneut dargelegt.

Bekanntermaßen haben neben den mechanischen Gesetzmäßigkeiten auch die zeitabhängigen sowie die thermischen Vorgänge Einfluß auf das Verformungsverhalten elastomerer Lagerwerkstoffe. Folgende Verformungsmechanismen, die sich teilweise überlagern, werden dabei wirksam:

- zeit- und temperaturabhängige Vorgänge, Kriechen und Relaxation
- entropieelastische Eigenschaften bei Temperaturänderungen /32/

Als Entropie-Elastizität wird dabei ein Verformungsvorgang verstanden, bei dem die aufgebrachte äußere Energie nicht als innere Energie wie bei kristallinen Stoffen gespeichert, sondern bei konstanter Umgebungstemperatur an die Atmosphäre abgegeben wird. Großen Einfluß auf das temperaturabhängige Verhalten hat die Werkstoffart des Lagers. So wirken sich beispielsweise Temperaturwechsel bei EPDM-Werkstoffen (Äthylen, Propylen-Copolymerisate) stärker auf das Verhalten unter Kriech- und Relaxationsbeanspruchung aus als bei CR-Werkstoffen (Polychloropren). Diese Unterschiede beruhen auf der größeren molekularen Beweglichkeit und geringeren Vernetzungsdichte bei EPDM. Änderungen der Umgebungstemperatur führen zu einer Spannungszunahme bei Erhöhung und zu einer Spannungsabnahme bei Senkung der Temperatur. Bei konstanter Verformung besteht zwischen Spannung und Temperatur ein direkt proportionaler Zusammenhang. Bei konstanter Spannung dagegen führt das Ansteigen der Temperatur zu einer Zunahme der Verformungen.

Das Langzeitverformungsverhalten wird vor allem durch folgende zeitabhängige Faktoren beeinflusst:

- Alterung; das sind mechanische, physikalische, chemische und klimatische Einflüsse und Vorgänge, die Veränderungen im molekularen Gefüge hervorrufen.
- Spannungs- und Verformungsänderungen bei konstanter Beanspruchung; diese ergeben sich durch Strukturänderungen infolge geometrischer Neuorientierung des molekularen Netzwerkes und durch chemische Strukturänderungen, die in Abhängigkeit von der Temperatur zu Vernetzungsbrüchen oder zur Bildung neuer Netzwerke führen.
- Beanspruchungsart; das heißt, daß für Lagerstauchungen wesentlich kleinere Kriechbeiwerte zu erwarten sind als für Schubverformungen und daß für Zugbeanspruchungen mit größeren Werten gerechnet werden muß.

- Beanspruchungshöhe; wachsende Verformungen führen zu einer Zunahme der Kriechneigung.
- Temperaturwechselbeanspruchung.

Von Müller wurden für CR- und EPDM-Werkstoffe das Langzeitverhalten und die Wirkung der entropie-elastischen Eigenschaften getrennt untersucht und unter anderem folgende Ergebnisse in /30/ und /31/ mitgeteilt:

- Die entropie-elastischen Reaktionen besitzen - bezogen auf den Langzeitverlauf - keine erkennbare Zeitabhängigkeit.
- Die entropie-elastischen Reaktionen sind bei den EPDM-Werkstoffen deutlich stärker als bei den CR-Werkstoffen und wirken sich unter Relaxationsbeanspruchung wiederum stärker aus als unter Kriechbeanspruchung.
- Die entropie-elastischen Reaktionen sind vor allem für schubbeanspruchte Lager bei plötzlichen größeren Temperaturwechseln von Bedeutung, da sich zeit- und temperaturbedingte Verformungen an das Lager grenzender Bauteile und Temperaturreaktionen des Lagers in ungünstiger Weise überlagern können und damit zu Spannungsspitzen führen.

3. Versuchseinrichtung

Der bereits für die Versuche zu /1/ benutzte Versuchsstand wurde in seiner Grundkonzeption auch für die hier durchgeführten Versuche beibehalten. Entsprechend der geänderten Aufgabenstellung und aufgrund der Erfahrungen bei den damaligen Versuchen wurde die Versuchseinrichtung in einigen Punkten weiterentwickelt und verbessert.

Eine Übersicht des verwendeten Versuchsstandes geben die Bilder 2 bis 5.

Die Anordnung des L a g e r s erfolgte jeweils zwischen zwei Betonplatten, die das stützende und das aufzulagernde Stahlbetonfertigteile simulierten. Diese Betonplatten wurden von Stahlformen eingefasst und gehalten, die eine Auswechslung ermöglichten und die bei der Herstellung bereits als Schalung gedient hatten, um eine gute Paßgenauigkeit zu gewährleisten. Die Betonplatten erhielten eine konstruktive Mattenbewehrung und wurden bei der Herstellung mit einer Stahlschiene von Hand abgezogen, um möglichst gleichmäßig reproduzierbare Rauigkeiten der Kontaktfläche zwischen Lager und Betonteil zu erzielen. Lediglich die für die Versuchsserie 2 vorgesehenen Betonplatten wurden auch mit anderen Oberflächenstrukturen (siehe Abschnitt 9.2) hergestellt, da bei den Versuchen dieser Serie der Einfluß unterschiedlicher Kontaktflächenrauigkeiten untersucht werden sollte.

Die Auflagerung für die untere Betonplatte und die Stahlform wurde von einem Stahlbetonauflegerbock gebildet, der direkt auf der Prüffelddecke stand, und einem Stahlbetonkörper, der durch Stahlprofile fest mit dem Auflagerbock verbunden war. Die obere Betonplatte war über die Stahlform an einem IPB-Träger befestigt, der

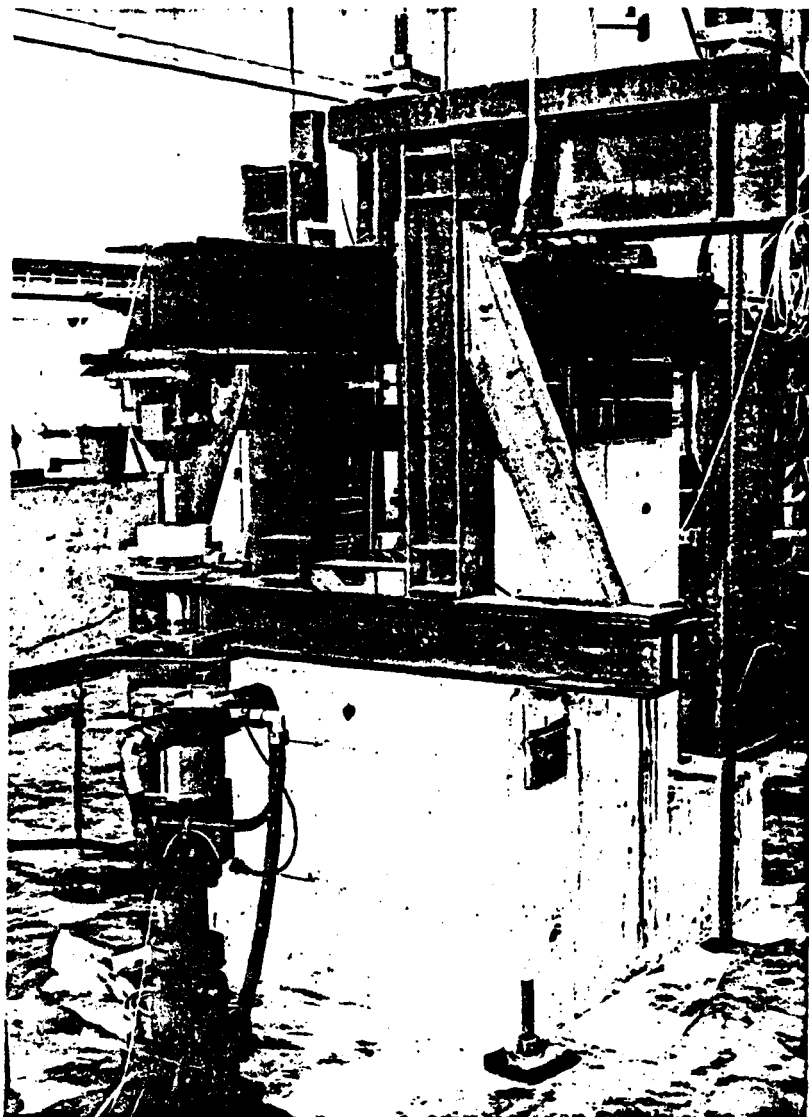
in den weiteren Ausführungen als Längsträger bezeichnet wird, da er parallel zur Symmetrieachse des Versuchsstandes verläuft und damit der Längstragrichtung des simulierten aufliegenden Bauteils entspricht. Über eine weggesteuerte Pendelstütze konnte der Längsträger und damit auch die an diesem befestigte Betonplatte sowohl nach oben wie auch nach unten verdreht und so die *V e r d r e - h u n g* des aufliegenden Bauteils simuliert werden. Die zum Aufbringen der Verdrehung erforderliche Vertikalkraft wurde über eine Kraftmeßdose, die in die Pendelstütze integriert war, direkt gemessen.

Die *v e r t i k a l e B e l a s t u n g F 1* wurde über zwei Zugstangen aus Spannstahl St 835/1030 Ø 36 und eine Quertraverse mit zwei hydraulischen 500-kN-Öldruckpressen, die unter der Prüffelddecke angeordnet waren, auf den Längsträger aufgebracht. Dabei wurde eine zwängungsfreie und nahezu lotrechte Lasteinleitung durch die Lagerung der Quertraverse auf einer Stahlhalbrolle erreicht, die einem Linienkipplager entspricht. Da Reibung der Zugstangen in den Durchführungen der Prüffelddecke zu einer Abminderung der mit den Pressen aufgebrachten Kraft führen konnte, wurde die aufgebrachte Vertikalkraft mittels zweier Kraftmeßdosen, die auf der Quertraverse angebracht waren, oberhalb der Prüffelddecke gemessen.

Um ein Ausweichen des Längsträgers aus der Symmetrieachse des Versuchsstandes zu verhindern, wurde zusätzlich eine Stahlkonstruktion auf dem Auflagerbock befestigt, die eine genaue *s e i t - l i c h e F ü h r u n g* des Längsträgers sicherstellte. Zur Verminderung dadurch auftretender Reibungskräfte wurden an die Führungskonstruktion und an den Längsträger aus Taktschiebelagern für Brücken herausgeschnittene Teflon-Gleitlager angeklebt.

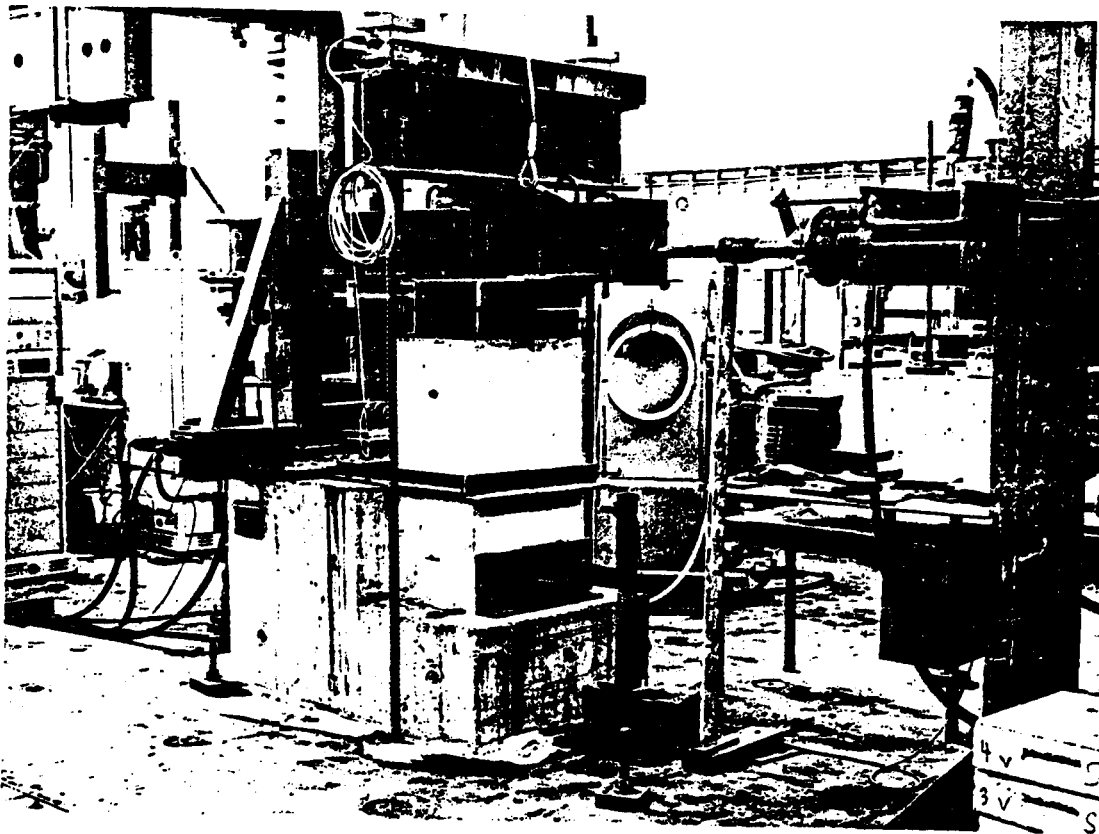
An dem der Pendelstütze entgegengesetzten Ende des Längsträgers konnte mittels einer hydraulischen Öldruckpresse, die an einem Prüfgerüst befestigt war, eine *H o r i z o n t a l k r a f t F* über ein Kugelgelenk zwängungsfrei auf den Längsträger und damit auf das aufliegende Bauteil aufgebracht werden.

Die Verschiebungen und Verdrehungen des aufliegenden Bauteils (Längsträger mit angesetzter Stahlform) wurden - bezogen auf den Auflagerbock - durch induktive Wegaufnehmer gemessen und direkt zu einem Rechner übermittelt, der daraus mit den in Abschnitt 7 angegebenen Gleichungen die Relativverschiebungen und -verdrehungen zwischen aufliegendem und unterstützendem Bauteil berechnete. Dabei konnten die Verschiebungen des unteren Stahlbetonkörpers auf dem Auflagerbock vernachlässigt werden, nachdem bei den Tastversuchen eine Überprüfung dieser Verschiebungen mittels mechanischer Meßuhren ergeben hatte, daß sie sehr klein sind und etwa im 1/100-mm-Bereich liegen.



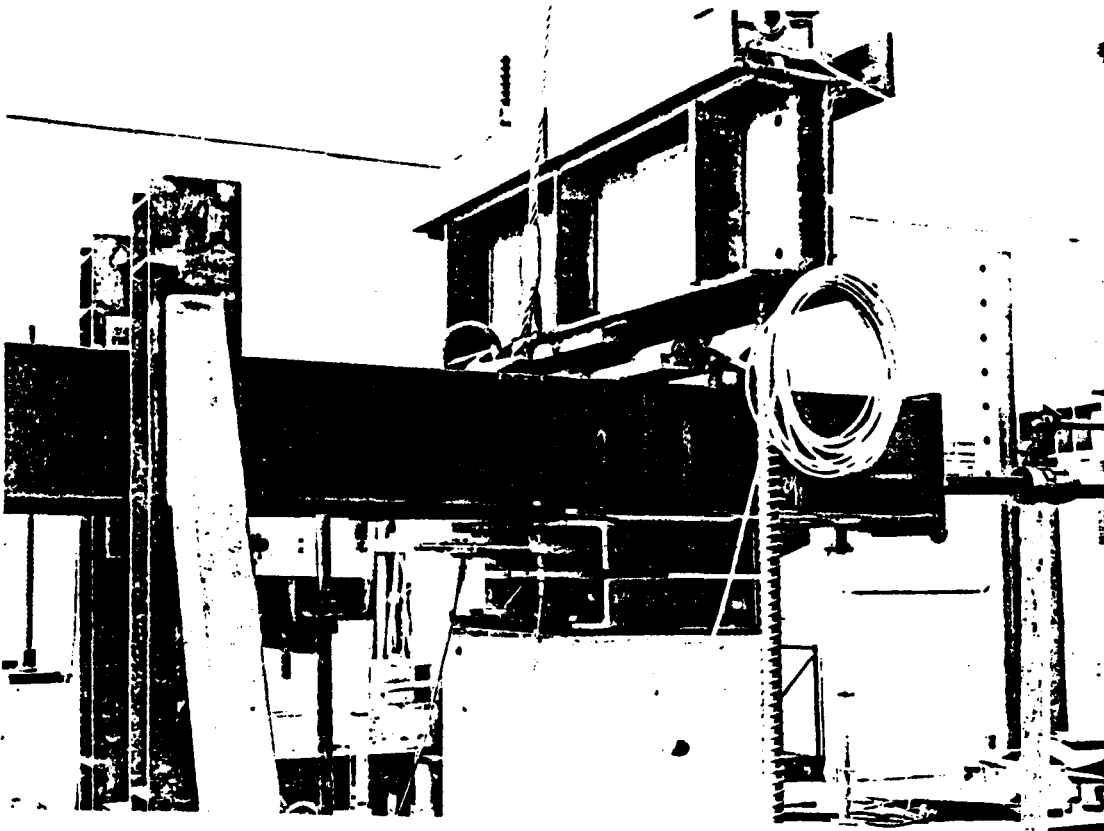
← Lager

Bild 2: Versuchseinrichtung vorne höhenverstellbare Pendelstütze



← Lager

Bild 3: Versuchseinrichtung rechts H-Kraft-Press



← Lager

Bild 4: Versuchseinrichtung oben Querträger, darunter Längsträger
} und Auflagerplatten

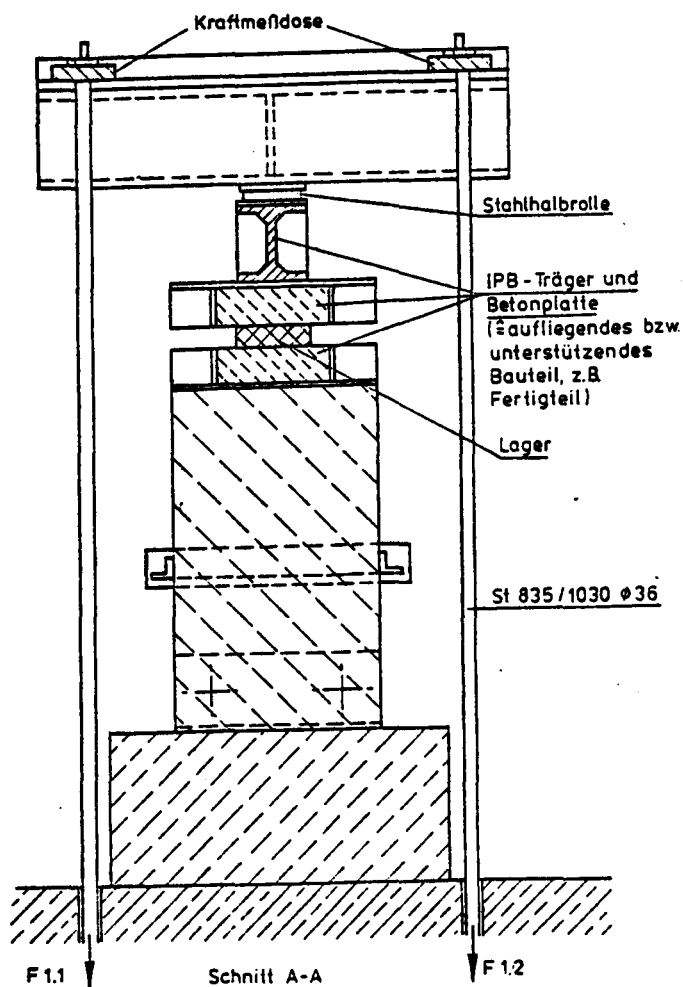
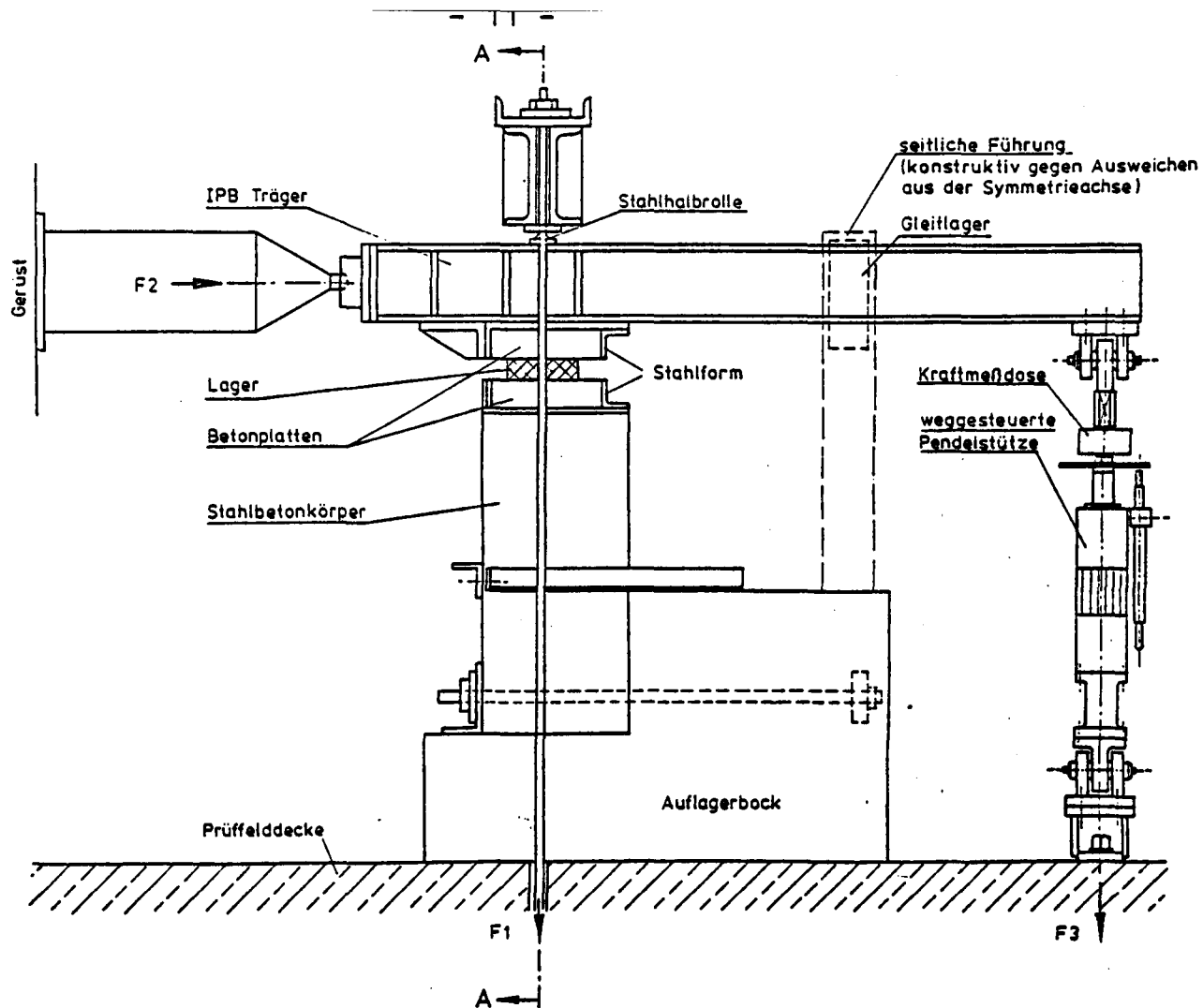


Bild 5:
Versuchseinrichtung

4. Untersuchte Elastomerlager

4.1 Unbewehrte Elastomerlager

Für die an unbewehrten Elastomerlagern durchgeführten Untersuchungen wurden ausnahmslos EPDM-Lager (Äthylen, Propylen-Copolymerisate) in zulassungsgemäßer Qualität verwendet. Zwar können von CR-Lagern bei Temperaturbeanspruchung und bei kombinierter Beanspruchung aus Vertikallast und Schub etwas günstigere Verformungswerte erwartet werden; nach Angaben von Lagerherstellern werden in der Praxis jedoch überwiegend EPDM-Lager wegen ihres günstigeren Preises eingesetzt. CR-Lager kommen vor allem dann noch zur Anwendung, wenn neben der tragenden Funktion zusätzlich Dichtungsfunktionen erfüllt werden sollen.

Vor der Versuchsdurchführung wurde die mittlere Shore-A-Härte und an den vier Eckpunkten des Lagers die mittlere Abweichung der Lagerdicke von der Solldicke gemessen. Dabei zeigte sich, daß die Shore-A-Härte bei Lagern gleicher Dicke nur vernachlässigbar geringe Abweichungen von den Mittelwerten aufwies, die unten angegeben wurden. Auch die Lagerdicke wies lediglich Unterschiede von im Mittel 0,2 mm zur Solldicke auf.

Es wurden unbewehrte Lager mit folgenden Abmessungen eingesetzt:

- Solldicke:

t = 5 mm, Shore-A-Härte 62

t = 10 mm, Shore-A-Härte 63

t = 20 mm, Shore-A-Härte 64

- Grundrißabmessungen:

a x b 200 x 200 mm

a x b 150 x 200 mm

a x b 100 x 200 mm

a x b 200 x 100 mm

4.2 Bewehrte Elastomerlager

Im Gegensatz zu den Untersuchungen an unbewehrten wurden bei den bewehrten Lagern ausschließlich solche aus Polychloropren - CR-Lager - untersucht, da EPDM-Materialien wegen der schlechten Vulkanisierbarkeit für bewehrte Lager ungeeignet sind und auch keine Zulassung für ein solches Lager vorliegt.

Die verwendeten bewehrten Lager waren durchweg unverankert, das heißt, sie wurden lose zwischen die angrenzenden Betonteile gelegt und nicht mit diesen durch Verzahnung oder Anordnung von Dollen verbunden.

Die Untersuchungen wurden an bewehrten Lagern mit folgenden Abmessungen durchgeführt:

a	x	b	x	d	T	n
100	x	150	x	35	25	4
150	x	200	x	14	10	1
150	x	200	x	35	25	4
150	x	200	x	56	40	7
200	x	250	x	52	37	4
250	x	300	x	52	37	4
Ø	x	200	x	52	37	4
Ø	x	250	x	52	37	4

Sowohl die unbewehrten wie auch die bewehrten Elastomerlager wurden freundlicherweise von der Firma Gumba, Vaterstetten, zur Verfügung gestellt.

5. Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm wurde entsprechend den betrachteten Einflüssen und Parametern in 12 Serien aufgeteilt, wobei in Serie 1 bis Serie 7 ausschließlich unbewehrte Elastomerlager und in Serie 8

bis 12 ausschließlich bewehrte Elastomerlager untersucht wurden. Die Zielsetzung und der Umfang der Versuche können der Tabelle A 1 entnommen werden. Die bei der Versuchsdurchführung aufgebrachten Belastungen und Verdrehungen sowie die daraus resultierenden Lagerverformungen sind in den Tabellen A 15 bis A 26 zusammengestellt

Um zuverlässige und genaue Aussagen über die Einflüsse der in den einzelnen Serien untersuchten Parameter zu erzielen, wurde angestrebt, die Zahl der zu einer Serie gehörigen Versuche möglichst groß zu wählen. Hierdurch sollten Schwankungen und Toleranzen bei den Lagermaterialien sowie bei der Oberflächenbeschaffenheit und der Maßhaltigkeit der angrenzenden Betonbauteile ausgeglichen werden. Da insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit der Betonplatten das Trag- und Verformungsverhalten unbewehrter Elastomerlager entscheidend beeinflusst (siehe Serie 2, Tabelle A 16), die Herstellung genau definierter und beliebig reproduzierbarer Oberflächenrauigkeiten mit labormäßig bestimmbar Eigenschaften nach den üblichen Herstellungsverfahren jedoch nicht möglich ist, können Schwankungen und geringfügige Abweichungen bei den Verformungen unbewehrter Lager infolge dieses Parameters nicht ausgeschlossen werden. Die Herstellung der Betonplatten in Stahlformen, der Handabzug der an das Lager angrenzenden Oberflächen mit einer Stahlschiene sowie die Verwendung genau gleicher Zuschläge und gleichen Zements bei allen Betonplatten gewährleisten jedoch im Sinne der baupraktischen Fragestellung der vorliegenden Arbeit eine ausreichende Begrenzung der Rauigkeitsunterschiede der verwendeten Betonplatten.

Entsprechend den Unterschieden im Trag- und Verformungsverhalten - die Querkontraktion des Elastomers in den Kontaktflächen wird durch die Stahleinlagen nahezu vollständig behindert - hat die Oberflächenrauigkeit bei bewehrten Elastomerlagern nur einen geringen Einfluß bei Vertikalbeanspruchung. Lediglich für den Gleitwiderstand dieses Lagertyps bei Horizontalbeanspruchung ist die Oberflächenrauigkeit von großer Bedeutung. Eine der Serie 2 - Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit und der Rauigkeit der an unbewehrte Lager angrenzenden Betonbauteile - entsprechende Versuchsreihe wurde daher nicht untersucht.

Auch der Einfluß kombinierter Mehrfachbelastungen und -verdrehungen auf die Verformungen bewehrter Elastomerlager wurde im Gegensatz zu den unbewehrten Elastomerlagern (Serie 5) nicht untersucht, da signifikante Verformungsdifferenzen nach wenigen Belastungszyklen wegen des bereits erläuterten geringen Einflusses der Reibungsänderung in den Kontaktflächen bewehrter Elastomerlager nicht zu erwarten waren. Ohnehin kann wegen der hier stark begrenzten Querkontraktion in den Kontaktflächen von sehr kleinen Änderungen der Reibungsverhältnisse bei Vertikalbelastung ausgegangen werden. Eine Beschränkung auf die Untersuchung des Einflusses von Mehrfachverdrehungen unter konstanter Belastung (Serie 11) schien deshalb - auch in Hinsicht auf die zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel - durchaus sinnvoll. Die in den Versuchen der Serie 11 gemessenen Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz} bestätigen dies im nachhinein und zeigen dementsprechend nur geringfügige Differenzen zwischen den Messungen des ersten und des dritten Verdrehungszyklus (siehe Tabelle A 25).

6. Versuchsdurchführung

Die Durchführung aller Versuche erfolgte auf der in Abschnitt 3 beschriebenen Versuchseinrichtung. Zur Abschätzung der bei den einzelnen Serien zu erwartenden Verformungen und zur Kontrolle sowie Erprobung des Versuchsstandes wurden zunächst 14 Tastversuche gefahren, deren Ergebnisse nicht dargestellt werden, da im Anschluß an diese Versuche noch einige kleinere Korrekturen an der Meßeinrichtung und an der Aufhängung der Pressen zur Vertikalbelastung vorgenommen wurden. Nach dem Abschluß der Tastversuche wurden die Versuchsserien in der Reihenfolge ihrer Numerierung untersucht.

Die Durchführung aller Versuche begann mit dem Einbau der Elastomerlager. Hierfür konnte der obere Teil der Versuchseinrichtung, bestehend aus Längsträger mit oberer Betonplatte und Quertraverse,

mit Hilfe eines Krans angehoben werden, so daß das Lager genau zentrisch auf die untere Betonplatte gelegt werden konnte. Anschließend wurde der Längsträger so auf das Lager abgesetzt, daß auch die obere Betonplatte genau zentrisch auf dem Lager auflag. Nachdem die Höhe der Pendelstütze so eingestellt war, daß der Verdrehungswinkel α zwischen aufliegendem und unterstützendem Bauteil Null betrug, wobei durch Herstellungsungenauigkeiten der Lager und der Betonplatten geringe Abweichungen hingenommen werden mußten, wurde in dieser **G r u n d e i n s t e l l u n g** der Versuchseinrichtung die Nullablesung vorgenommen. Während hierbei in horizontaler Richtung noch keine Belastung wirkte ($H = F_2 = 0$), war vertikal das Eigengewicht der Belastungseinrichtung von $V = F_4 \sim 10,8 \text{ kN}$ bereits vorhanden. Diese Vertikalbelastung gewährleistete, daß kleinere örtliche Unebenheiten der Kontaktflächen bereits bei der Nullablesung weitgehend überdrückt waren. Die bei den anschließenden Laststufen unter höherer vertikaler Belastung gemessenen Zusammendrückungen konnten somit als reine Lagerstauchungen gewertet werden.

Die **V e r t i k a l b e l a s t u n g** wurde in stets gleichbleibenden Laststufen aufgebracht. Da die aufgebrachten Kräfte mittels zweier Kraftmeßdosen auf der Quertraverse und einer Kraftmeßdose in der Pendelstütze direkt zu einem Rechner übermittelt wurden, konnte die Vertikalbelastung sofort kontrolliert und, falls erforderlich, korrigiert werden. Auch Änderungen der Vertikalbelastung infolge Horizontalbeanspruchung und Winkelverdrehung des aufliegenden Bauteils konnten aufgrund sofortiger Auswertung der Meßergebnisse berücksichtigt werden. Die maximale Abweichung der Vertikalkraft zum Sollwert wurde solcherart auf etwa ein Prozent begrenzt.

Auch die Aufbringung der H o r i z o n t a l b e a n s p r u -
h u n g erfolgte stufenweise. Die Größe der Horizontalkraft
wurde dabei direkt an der Presse abgelesen und von Hand in den
Rechner eingegeben. Auf den Einbau einer Kraftmeßdose und die da-
mit gegebene Kontrollmöglichkeit wurde hier verzichtet, da die
Kraft unmittelbar auf den Längsträger aufgebracht wurde und Rei-
bungsverluste somit nicht auftreten konnten.

Die für die stufenweise Aufbringung der W i n k e l v e r -
d r e h u n g erforderliche Längenänderung der weggesteuerten
Pendelstütze wurde aufgrund der gemessenen Lagerverformungen und
der Geometrie der Versuchseinrichtung für die jeweils folgende
Laststufe mit den in Abschnitt 7 angegebenen Beziehungen vom
Rechner ermittelt und digital angezeigt. Da die Winkelverdrehung
selbstverständlich auch Änderungen der Lagerverformungen
zur Folge hatte, gaben diese errechneten Längenänderungen der
Pendelstütze lediglich einen Anhaltspunkt für die Größenordnung
des Weges der Pendelstütze und mußten entsprechend korrigiert
werden. Nach den Erfahrungen der Tastversuche und einiger Ver-
suche der Serie 1 konnten die Korrekturwerte so abgeschätzt wer-
den, daß ein- bis zweimaliges Nachstellen der Pendelstütze genüg-
te, um die angestrebte Windelverdrehung mit einer maximalen Ab-
weichung von ca. $\Delta\alpha = 0,0002$ rad aufzubringen. Mit Ausnahme eini-
ger Versuche an 5 mm dicken unbewehrten Elastomerlagern, bei de-
nen schon bei Winkelverdrehungen von $\alpha = 0,02$ bis $\alpha = 0,025$ rad
die obere und die untere Betonplatte aneinander stießen, wurde
bei allen Versuchen eine maximale Verdrehung bis zu $\alpha = 0,03$ rad
untersucht. Dieser Wert entspricht in etwa der in der Baupraxis
für Fertigteilauflagerungen zu erwartenden Größenordnung bei Win-
kelverdrehungen, die sich infolge planmäßiger Durchbiegungen der
aufgelagerten Fertigteilbinder und unplanmäßiger Herstellungsun-
genauigkeiten vor allem beim Verlegen der Lager ergeben. Insbe-
sondere dieser unplanmäßige Anteil sollte durch große Sorgfalt
bei der Herstellung der Auflagerbereiche möglichst klein gehalten
werden, um zu große Winkelverdrehungen zu vermeiden.

Wegen der großen Bedeutung der Kontaktflächenrauigkeit auf das Verformungsverhalten unbewehrter Elastomerlager wurde bei allen Versuchen mit diesem Lagertyp (Serie 1 bis Serie 7) einmöglichst gleichbleibende Oberflächenbeschaffenheit der B e t o n p l a t t e n angestrebt. Durch die Vergrößerung der Grundfläche unbewehrter Elastomerlager bei vertikaler Beanspruchung treten Verschiebungen in der Kontaktfläche auf, die zu Gummiabrieb und Glättung der Betonflächen führen. Im Rahmen der Tastversuche wurde daher auch untersucht, ab wann mehrmaliger Einsatz der gleichen Betonflächen zu signifikanten Unterschieden bei den Lagerstauchungen führt. Die Ergebnisse zeigten, daß bei maximalen Spannungen von $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ nach drei Belastungsvorgängen noch keine nennenswerten Unterschiede festgestellt wurden. Dies stimmt auch mit den in /1/ zu dieser Frage mitgeteilten Untersuchungsergebnissen überein. Folgende Festlegungen wurden daher für die Intervalle getroffen, nach denen sowohl die obere wie auch die untere Betonplatte auszuwechseln war: Bei den Versuchen mit maximaler Spannung von $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ wurden die Betonplatten dreimal eingesetzt und bei Spannungen $\sigma_m > 5 \text{ N/mm}^2$ zweimal. Wurde bei den Versuchen zusätzlich eine Horizontalkraftbeanspruchung aufgebracht oder die Verdrehung bzw. die Belastung mehrfach wiederholt, erfolgte die Auswechslung nach jedem Versuch. Bei den Versuchen mit bewehrten Elastomerlagern wurden die Betonplatten in der Regel jeweils nach fünf Versuchen ausgetauscht, da der Einfluß der angrenzenden Betonflächen auf das Verformungsverhalten hier von untergeordneter Bedeutung ist. Lediglich bei den Versuchen der Serie 9 erfolgte die Auswechslung wegen der Horizontalkraftbeanspruchung auch bei den bewehrten Lagern nach jedem Versuch. Zusätzlich wurden die Betonplatten nach jedem Versuch in Augenschein genommen und überprüft, ob der anhaftende Gummiabrieb das übliche Maß überschritt. War dies der Fall, wurden neue Betonplatten auch vor dem Ablauf der oben genannten Intervalle eingebaut.

Die B e l a s t u n g s g e s c h w i n d i g k e i t bzw. die V e r d r e h u n g s g e s c h w i n d i g k e i t betrug pro Laststufe im allgemeinen ca. 2 bis 3 Minuten, wobei mit einer für

alle Versuche gleichbleibenden Anzahl von Laststufen gearbeitet wurde. Es wurden 0,5 bis 2,0 min für $\Delta\sigma_m = 1,0 \text{ N/mm}^2$ benötigt. Für die Horizontalkraft, die gleich der Pressenkraft F_2 ist, betrug die Geschwindigkeit ca. $\Delta t = 1 \text{ min pro } \Delta H = 10 \text{ kN}$. Für die Verdrehung gilt, daß pro Minute ungefähr $\Delta\alpha = 0,002 \text{ rad}$ aufgebracht wurden.

Die Reihenfolge der Beanspruchungen, die Größe der Belastungen und der Winkelverdrehungen sowie der Versuchsumfang der untersuchten Versuchsserien sind in den Tabellen A 2 bis A 13 dieses Berichts für alle durchgeführten Versuche ausführlich dargestellt und dort zu entnehmen. Auf eine geänderte Darstellung der Versuchsabläufe an dieser Stelle wird verzichtet.

Die in Bild dargestellten mechanischen Meßuhren Nr. 4 bis 7 wurden lediglich bei den Tastversuchen aufgestellt und abgelesen, um die Stauchung und Verdrehung des Beton-Auflagerkörpers zu messen. Da diese Verformungen vernachlässigbar klein waren, konnten die Meßuhren nach Abschluß der Tastversuche entfernt werden. Auch die Schrägstellung der Vertikalkräfte F_1 und F_3 sowie die Lagerstauchung infolge Eigengewicht wurden bei der Auswertung vernachlässigt, da Abweichungen hierdurch etwa in der Größenordnung von Prozent bleiben und die Erfassung dieser Einflüsse zu ungerechtfertigt hohem Aufwand geführt hätte.

Die Gleichungen lauten im einzelnen:

Belastungen des Lagers:

$$V = F_1 + F_3 + F_4 \text{ mit } F_1 = F_{1,2} + F_{1,2}$$

$$H = F_2$$

Verformungen des Lagers:

$$\alpha = \frac{s_3 - s_2}{2 \cdot l_4}$$

$$w = \frac{s_1 + s_1'}{2}$$

$$f_{\text{zen}} = \frac{s_3 + s_2}{2}$$

$$f_{\text{exz}} = f_{\text{zen}} + \alpha \cdot e$$

- Exzentrizität der Vertikallast:

$$e = \frac{(F_1 + F_4) \cdot (w + \alpha \cdot l_1) + F_2 \cdot l_2 + F_3 \cdot (l_3 + w)}{F_1 + F_3 + F_4}$$

- Kontrolle des an der Pendelstütze aufgebrauchten Weges:

$$s_8 = \frac{s_2 + s_3}{2} + \frac{(s_3 - s_2) \cdot l_3}{2 \cdot l_4}$$

8. Darstellung der Versuchsergebnisse

Eine umfangreiche Darstellung der Versuchsergebnisse enthält der Anhang A dieses Berichts. Die Verformungen α , f_{zen} , f_{exz} , w und e sind den Tabellen und Bildern dieses Anhangs zu entnehmen.

Tastversuche: Auf eine Darstellung dieser Versuche wurde verzichtet, da im Anschluß hieran noch einige kleinere Korrekturen an der Versuchseinrichtung vorgenommen wurden.

Versuche mit unbewehrten Elastomerlagern

Serie 1: Tabelle A 15.1 bis A 15.4
Bilder A 1 bis A 60

Serie 2: Tabelle A 16
Bilder A 61 bis A 109

Serie 3: Tabelle A 17
Bilder A 110 bis A 134

Serie 4: Tabelle A 18
Bilder A 135 bis A 138

Serie 5: Tabelle A 19
Bilder A 139 bis A 165

Serie 6: Tabelle A 20
Bilder A 166 bis A 189

Serie 7: Tabelle A 21

Versuche mit bewehrten Elastomerlagern

Serie 8: Tabelle A 22
Bilder A 190 bis A 226

Serie 9: Tabelle A 23
Bilder A 227 bis A 248

Serie 10: Tabelle A 24

Serie 11: Tabelle A 25
Bilder A 249 bis A 275

Serie 12: Tabelle A 26
Bilder A 276 bis A 277

9. Auswertung der Versuche an unbewehrten Elastomerlagern und Diskussion der Ergebnisse

9.1 Ergebnisse der Serie 1, Einfluß erhöhter Pressungen auf das Verformungsverhalten

Bei den Versuchen der Serie 1 wurde nach dem Aufbringen der vertikalen Beanspruchung ($\sigma_m = 5,0; 10,0; 20,0$ oder $30,0 \text{ N/mm}^2$) in vier jeweils gleichen Stufen - eine horizontale Belastung wurde nicht aufgebracht ($H = 0$) - der Verdrehungswinkel α in Schritten von $\Delta\alpha = 0,0025 \text{ rad}$ bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 5 \text{ mm}$ und in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005 \text{ rad}$ bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ von $\alpha = 0,000 \text{ rad}$ auf $\alpha = 0,03 \text{ rad}$ gesteigert. Danach wurde die Verdrehung in Schritten von $\Delta\alpha = 0,01 \text{ rad}$ zurückgefahren und das Lager stufenweise entlastet. Die kleinere Schrittweite bei der Verdrehung der 5 mm dicken Lager wurde gewählt, um eine ausreichende Anzahl von Messungen mit unterschiedlicher Winkelverdrehung zu erhalten, da hier die Betonplatten bzw. die Stahlformen wegen des geringen Abstandes bereits bei kleineren Winkelverdrehungen gegeneinanderstießen und somit nicht in allen Fällen der angestrebte Verdrehungswinkel von $\alpha = 0,03 \text{ rad}$ aufgebracht werden konnte.

Die Versuchsdurchführung der Serie 1 entspricht der der Serie 6 in /1/ und stellt für das vorliegende Versuchsprogramm die Grundform dar, die für die Untersuchung der verschiedenen, das Tragverhalten bestimmenden Einflüsse in den Versuchen der nachfolgenden Serien entsprechend erweitert oder abgeändert wird. Die Serie ermöglicht damit einen Vergleich zu den in /1/ durchgeführten Versuchen und liefert auch Vergleichswerte für die anschließend durchgeführten Serien 2 bis 7. Aus diesem Grund wurden in Serie 1 alle unter Abschnitt 4.1 angegebenen Lagerabmessungen eingesetzt. Über die Bereitstellung von Vergleichswerten hinaus wurde, ausgehend von Versuchen mit einer Pressung von $\sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2$, der Einfluß hoher Pressungen bei Verdrehung der angrenzenden Bauteile untersucht. Dabei wurden mittlere Vertikalspannungen bis zu

$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ bzw. $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ aufgebracht, die um den Faktor 4 bzw. 6 außerhalb der derzeit gültigen Baubestimmungen / 2 / liegen.

Für die Beurteilung der Zulässigkeit erhöhter Vertikalspannungen werden folgende Kriterien und Werkstoffeigenschaften betrachtet:

- Verformungen bzw. Einfederung der Lager
- Zunahme der Kriechverformung
- Gleitsicherheit bzw. Zunahme der Schubverformungen bei Verdrehung der Auflager
- Alterungsverhalten

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit konnten nicht alle genannten Kriterien untersucht werden, da beispielsweise Aussagen zur Gleitsicherheit aufgrund der durchgeführten Versuche nur eingeschränkt möglich sind und auch das Alterungsverhalten von Elastomerlagern nicht Gegenstand dieser Arbeit war.

Zur Frage der Gleitsicherheit unbewehrter Elastomerlager unter bis zu $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ erhöhten Pressungen bemerkt z. B. Schrage in /40/, daß auch unter solchen Beanspruchungen die Gleitsicherheit als gegeben angesehen werden kann, wenn als Kriterium dafür die Fähigkeit vorausgesetzt wird, auch bei Bewegungen, die deutlich oberhalb der rechnerischen Schiefstellung $\tan \gamma = 0,7$ liegen, noch in etwa zur Schiefstellung direkt proportionale Horizontalkräfte ohne Gleitbewegung aufnehmen zu können.

Zur Zunahme der Kriechverformungen unter erhöhten Pressungen werden in Abschnitt 9.4 dieses Berichts, in dem die Versuchsergebnisse der Serie 4 erläutert werden, einige Angaben erfolgen.

Mit den Versuchen der Serie 1 sollte vor allem die Zunahme der Lagerstauchung unter hohen Vertikallasten und die Größe der Exzentrizität bei gleichzeitiger Verdrehung des aufliegenden Bauteils untersucht werden.

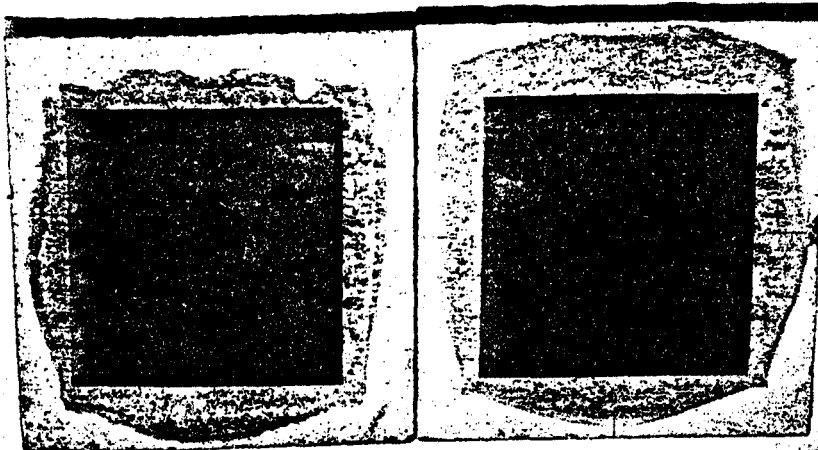
9.1.1 Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz}

Unter ausmittiger Belastung muß zwischen der Stauchung in der Lagerachse (f_{zen}) und der Stauchung in der Achse der ausmittig angreifenden Vertikallast (f_{exz}) unterschieden werden. Beide Werte sind für die Versuche der Serie 1 in Abhängigkeit vom Verdrehungswinkel α in den Bildern A 16 bis A 43 dargestellt.

Bei allen Versuchen zeigte sich eine Zunahme der f_{exz} -Werte bzw. ein Abfall der f_{zen} -Werte bei Steigerung des Verdrehungswinkels α . Dies ist auf die Erhöhung der Lagerbeanspruchung im lastzugewandten Bereich zurückzuführen. Die ebenfalls bei allen Versuchen festgestellte Erhöhung der Lagerstauchungen beim Zurückfahren der Verdrehung gegenüber den Stauchungen beim Aufbringen des Verdrehungswinkels ergibt sich durch die bereits bei einmaliger Bewegung auftretende Verringerung der Querdehnungsbehinderung in den Kontaktflächen. Wegen der annähernden Inkompressibilität der elastomeren Werkstoffe ist jede Lagerstauchung mit einer Auswölbung der seitlichen Flächen und, falls keine schubfeste Verbindung in den Kontaktflächen besteht - wie bei den vorliegenden Versuchen -, mit einer Vergrößerung der Grundrißfläche verbunden, die um so größer ist, je mehr die Querdehnungsbehinderung in den Kontaktflächen abnimmt, und die damit auch zu größeren Lagerstauchungen führt. Diese Abnahme der Querdehnungsbehinderung kann wie folgt erklärt werden:

Die in den Bildern A 44 bis A 60 in Abhängigkeit von der Belastung V dargestellte Horizontalverschiebung w der Lager zeigt, daß die infolge der Lagerverdrehung auftretende Horizontalkraftkomponente zu bereits beträchtlichen Horizontalverschiebungen w führt. Die nach der Entlastung verbleibende Horizontalverschiebung w und ihr Größtwert bei maximaler Verdrehung weisen darauf hin, daß das Lager zwischen den Kontaktflächen einen Gleitweg zurückgelegt hat, der in etwa der Horizontalverschiebung entspricht, die nach der Entlastung gemessen wurde. Dieses Gleiten wurde insbesondere bei den Versuchen unter hohen Pressungen von

einem Abrollen oder bei kleineren Wegen von einem Abheben der Lager begleitet, das auch in der Literatur bereits mehrfach beschrieben wurde (siehe z. B. /14/ und /40/). Die Verringerung der Querdehnungsbehinderung in den Kontaktflächen wird durch diesen Bewegungsvorgang herbeigeführt, da bei der ersten Bewegung das in die Oberflächenunebenheiten hineingepreßte Gummi teilweise abgeschert wird und der Reibungsschluß zwischen Lager und Kontaktfläche bei nachfolgenden Belastungen bzw. bei Belastungsänderungen somit geringer ist. Diese Abnahme der Widerstände auf rauen Spuren nach dem ersten Reibvorgang wurde auch von Schrage / 40 / beobachtet. Die in den Bildern 8 und 9 auf den Betonoberflächen sichtbaren Verschleißspuren bestätigen die obigen Ausführungen.



Auflagerplatten
nach der Versuchsdurchführung;
links unterstützendes
Bauteil,
rechts aufliegendes
Bauteil

Bild 8: mit Lager

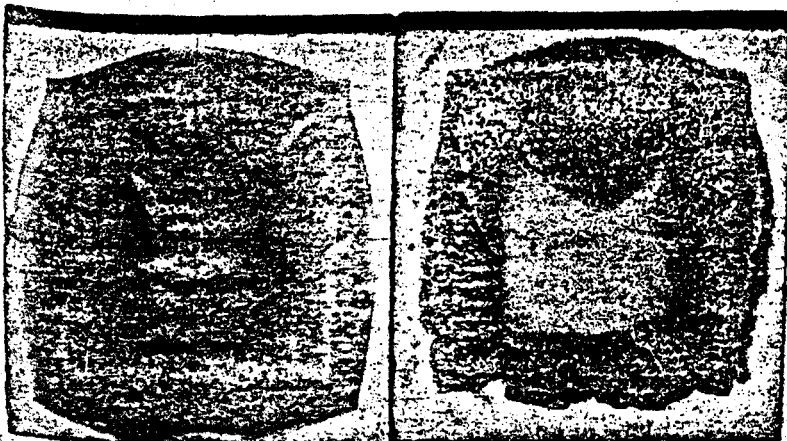


Bild 9: ohne Lager

Die in den Versuchen gemessenen Lagerstauchungen (siehe Tabelle A 15.1 - A 15.4) wurden mit den Werten verglichen, die sich nach folgenden Ansätzen ergaben:

- (1) Berechnungsvorschlag der italienischen Norm / 3 / und des ORE / 4 /:

$$f_{\text{ORE}} = t \cdot \frac{\sigma_m}{10 \cdot G \cdot S + 2 \cdot \sigma_m}$$

- (2) Berechnungsvorschlag des Ministry of Transport, London / 5 /:

$$f_{\text{MOT}} = \frac{\sigma_m}{6 \cdot K \cdot G \cdot S^2 + 3 \cdot G}$$

mit $K = 0,6$ für Shore-A-Härte 60

- (3) Berechnungsvorschlag des Laboratoire des Coontchone, Paris / 6 /

$f_{\text{LdC}} = t \cdot \epsilon$, wobei ϵ iterativ zu ermitteln ist aus:

$$\sigma_m = E \cdot \frac{\epsilon}{1 - \epsilon} \cdot 1 + \frac{10 \cdot k^2}{(E + 1) \cdot (k + 3)} \quad \begin{array}{l} E \text{ in N/mm}^2 \\ k = S/\sqrt{(1 - \epsilon)^3} \end{array}$$

Um die Abweichungen der in den Versuchen gemessenen Lagerstauchungen von den nach den rechnerischen Ansätzen erwarteten Werten auch für unterschiedliche Lagerdicken und Lagerabmessungen vergleichen zu können, wurde für alle Laststufen ohne Winkelverdrehung ($\alpha = 0$) der Quotient aus der im Versuch gemessenen Lagerstauchung f_{zen} und den nach den drei Rechenansätzen erwarteten Werten gebildet. Die Mittelwerte dieser Quotienten sind in Tabelle für die verschiedenen untersuchten Lager angegeben. Im Idealfall, wenn die erwartete und die gemessene Stauchung übereinstimmen, ergibt sich für den Quotient der Wert 1,0.

$\alpha = 0$			
Lagerabmessungen $t \times a \times b$	$\frac{f_{zen}}{f_{ORE}}$	$\frac{f_{zen}}{f_{MOT}}$	$\frac{f_{zen}}{f_{LdC}}$
x 100 x 200	2,162	4,019	1,922
x 100 x 200	1,158	0,926	0,711
x 100 x 200	1,083	0,444	0,728
x 200 x 100	2,031	3,849	1,417
x 200 x 100	1,313	1,069	0,733
x 200 x 100	1,139	0,511	0,755
x 200 x 200	3,810	12,406	2,702
x 200 x 200	1,531	2,261	1,073
x 200 x 200	1,137	0,722	0,687
x 150 x 200	3,144	8,454	1,952
x 150 x 200	1,433	1,941	0,867
x 150 x 200	0,916	0,576	0,672

Tabelle 1: Mittelwerte der Quotienten aus den im Versuch gemessenen Lagerstauchungen und den Lagerstauchungen nach verschiedenen Rechenansätzen

Die Tabelle 1 zeigt, daß alle drei Berechnungsvorschläge für Lager mit einer Dicke $t = 5 \text{ mm}$ erheblich von den gemessenen Werten f_{zen} abweichende Aussagen liefern und die tatsächlich eintretende Lagerstauchung unterschätzt wird. Für die Lager mit einer Dicke von $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ ergibt sich bei allen Vorschlägen eine bessere Übereinstimmung zwischen den erwarteten und den gemessenen Werten. Die nach Vorschlag (1) errechneten Lagerstauchungen waren dabei überwiegend kleiner als die in den Versuchen gemessenen Werte. Dabei wurden Abweichungen zwischen 8 % und 53 % - bezogen auf den rechnerischen Wert - festgestellt. Nach den Rechenansätzen des Vorschlags (2) ergeben sich für Lagerdicken $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ Werte f_{zen}/f_{MOT} sowohl kleiner wie auch größer 1,0 und damit Unter- bzw. Überschätzungen der tatsächlichen Lagerstauchungen. Der

Vorschlag (3) liefert für Lagerdicken $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ überwiegend zu große Rechenwerte mit teilweise erheblichen Abweichungen. Ein eindeutiger Einfluß der Lagerfläche und damit der Kontaktflächengröße zwischen Lager und angrenzendem Bauteil auf die Übereinstimmung der Vorschläge (1) und (2) mit den gemessenen Lagerstauchungen ist nicht festzustellen. Bei Vorschlag (3) ist für die dickeren Lager mit zunehmender Grundrißfläche eine Abnahme der Abweichung erkennbar.

Da die in der Tabelle 1 mitgeteilten Werte lediglich eine Abhängigkeit der einzelnen Vorschläge zur Ermittlung der Lagerstauchung von der Lagerdicke und der Lagerfläche aufzeigen können, werden in der Tabelle 2 zusätzlich die Mittelwerte der Quotienten $f_{\text{Versuch}}/f_{\text{Rechenvorschlag}}$ für die verschiedenen aufgebrauchten mittleren Vertikalspannungen angegeben.

mittlere Vertikalspannung $\sigma_m \text{ N/mm}^2$	Lagerdicke $t \text{ mm}$	$\alpha = 0$		
		$\frac{f_{\text{zen}}}{f_{\text{ORE}}}$	$\frac{f_{\text{zen}}}{f_{\text{MOT}}}$	$\frac{f_{\text{zen}}}{f_{\text{LdC}}}$
2,5	5,0	3,845	11,692	2,475
5,0		2,893	7,617	1,986
10,0		2,243	6,150	1,665
15,0		1,826	3,526	-
20,0		1,744	3,908	-
30,0		1,773	2,280	-
2,5	10,0 und 20,0	1,154	1,288	0,682
5,0		1,168	1,098	0,758
10,0		1,254	0,906	0,873
15,0		1,427	1,009	-
20,0		1,399	0,728	-
30,0		-	-	-

Tabelle 2: Mittelwerte der Quotienten aus den im Versuch gemessenen Lagerstauchungen und den Lagerstauchungen nach verschiedenen Rechenansätzen in Abhängigkeit von der Lagerdicke und der mittleren Vertikalspannung

Die Tabelle 2 zeigt, daß die Abweichung der nach den Rechenansätzen erwarteten Lagerstauchungen von den in den Versuchen gemessenen Werten mit zunehmender mittlerer Vertikalspannung bei den Lagern mit einer Dicke $t = 5 \text{ mm}$ abnimmt. Für die Lager mit Dicken $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$, die in dieser Betrachtung zusammengefaßt werden, da bei beiden Lagerdicken eine annähernd gleich gute Übereinstimmung der erwarteten mit den gemessenen Werten festgestellt wurde, zeigen sich unterschiedliche Tendenzen bei den drei Rechenansätzen. Der Berechnungsvorschlag (1) zeigt die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Werten bei mittleren Spannungen $\sigma_m = 2,5 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2$. Bei Berechnungsvorschlag (2) ergeben sich Abweichungen von den gemessenen Werten sowohl nach oben wie auch nach unten. Ein eindeutiger Zusammenhang mit der Größe der mittleren Vertikalspannung ist nicht feststellbar. Bei Berechnungsvorschlag (3) wird die Abweichung bei zunehmender Spannung kleiner.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß die Berechnungsvorschläge (1) und (2) die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen liefern und auch in der Handhabung am einfachsten sind. Den relativ großen Abweichungen bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 5 \text{ mm}$, die die Tabellen 1 und 2 aufzeigen, sollte bei einer Beurteilung der Berechnungsvorschläge keine allzu große Bedeutung beigemessen werden, da bei Lagern mit kleiner Dicke nur geringe absolute Lagerstauchungen auftreten (siehe Tabelle A 15) und somit auch große prozentuale Abweichungen mit ihrer absoluten Größe in der Regel kleiner als $\Delta f_{\text{zen}} = 1,0 \text{ mm}$ bleiben und damit im Bereich der bauüblichen Toleranzen liegen.

Die in der Tabelle A 15 angegebenen Lagerstauchungen zeigen, daß bei niedrigen Vertikalspannungen die Einfederung der Lager mit geringer Grundfläche größer ist als die mit größerer Grundfläche. Die Ursache hierfür kann darin gesehen werden, daß die größere Lagerfläche eine Verringerung der Gleitvorgänge in den Kontaktflächen bei gleicher mittlerer Vertikalspannung zur Folge hat. Bei hohen Pressungen ($\sigma_m > 10 \text{ N/mm}^2$) nimmt der Einfluß der Lagerfläche auf die Lagerstauchungen ab, was darauf schließen läßt,

daß die Tendenz zu Gleiterscheinungen in den Kontaktflächen zunimmt. Dies wird bestätigt durch das in den Bildern 8 und 9 sichtbare Ausbreitmaß hochbelasteter Lager.

9.1.2 Horizontalverschiebungen w

Die in den Versuchen der Serie 1 gemessenen Horizontalverschiebungen w sind in den Bildern A 44 bis A 60 des Anhangs A in Abhängigkeit von der Vertikalbelastung V dargestellt. Der in diesen Diagrammen parallel zur Abszisse verlaufende Bereich gibt die Verschiebungen an, die nach dem Aufbringen der Vertikalbelastung bei zusätzlicher Verdrehung der angrenzenden Bauteile in den einzelnen Laststufen gemessen wurden. Daneben sind auch die Laststufen dargestellt, in denen die Vertikalbelastung aufgebracht bzw. wieder zurückgefahren wurde. Die Bilder zeigen, daß nach der Entlastung der Lager vielfach eine erhebliche bleibende Verschiebung w gemessen wurden, die z. B. bei Versuch S1.35 (s. Bild A 48) ca. 10,5 mm beträgt. Dies beweist, daß bei den hier verwendeten, lose verlegten, unbewehrten Elastomerlagern infolge der Horizontalkomponenten aus der Schiefstellung der Vertikalbelastung, die sich durch die Winkelverdrehung der angrenzenden Bauteile ergibt, Relativverschiebungen entstehen, die sich aus einem elastischen Verformungsanteil u und einem Gleitanteil v zusammensetzen. Als Gleitanteil v kann dabei die nach der Entlastung verbleibende Verschiebung angesehen werden, da die letzte Messung einige Minuten nach der vollständigen Entlastung vorgenommen wurde, so daß bis zu diesem Zeitpunkt auch eventuelle elastisch verzögerte Rückverformungen abgeklungen sein mußten. Die in Tabelle A 15 angegebenen Verschiebungen w und die Bilder A 44 bis A 60 erlauben folgende Feststellungen:

- Die bereits unter reinen zentrischen Vertikallasten gemessenen Verschiebungen w liegen für Spannungen $\sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 10,0 \text{ N/mm}^2$ in der Größenordnung von 0 bis 5 % der Lagerdicke. Bei den 5 mm dicken Lagern gilt diese Größenordnung auch für $\sigma_m = 20,0 \text{ N/mm}^2$. Bei den 10 mm und 20 mm dicken Lagern er-

geben sich für $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ bereits Verschiebungen zwischen 20 % und 35 % - bezogen auf die Lagerdicke. Bei Spannungen größer $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ steigen für alle Lagerdicken die Verschiebungen unter zentrischer Belastung auf Werte bis weit über 20 % - bezogen auf die Lagerdicke - an.

Die infolge der Winkelverdrehungen gemessenen Horizontalverschiebungen sind starken Streuungen unterworfen. Insbesondere wegen der bereits bei planmäßig mittigen Lasten ($\alpha = 0,000 \text{ rad}$) vorhandenen Verschiebungen ist ein aussagekräftiger Vergleich der gemessenen mit den theoretisch erwarteten Werten nicht möglich.

Die Verschiebungen unter vertikaler Belastung und gleichzeitiger Verdrehung der angrenzenden Bauteile erreichen vor allem unter hohen Pressungen Größenordnungen, die nur durch Gleitbewegungen in den Kontaktflächen ermöglicht werden und nicht ausschließlich durch elastische Verformungen der Lager aufgenommen werden können.

9.1.3 Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft

Die in der Tabelle A 15 mitgeteilten Werte der gemessenen Exzentrizitäten und die in Bild A 1 bis A 15 dargestellten α -e-Diagramme bestätigen die bereits in /1/ getroffenen Feststellungen, daß

- trotz äußerster Sorgfalt bei der Herstellung der Betonauflagerplatten und bei der Versuchsdurchführung bereits in der Grundeinstellung unter planmäßig mittigen Lasten Exzentrizitäten auftreten, die unter Baustellenbedingungen sicherlich noch erheblich größer sein dürften;
- vor allem die α -e-Kurven der Lager mit einem geringen Verhältnis t/a (z. B. $t = 5 \text{ mm}$, $a = 200 \text{ mm}$) Krümmungen aufweisen, die der Wirkung einer mit steigendem Verdrehungswinkel zunehmend klaffenden Fuge entsprechen.

Zur rechnerischen Bestimmung der Größe der Exzentrizität e wurde in /1/ folgende empirisch ermittelte Näherung für Lagerbeanspruchungen bis zu $\sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2$ angegeben:

$$e = \frac{a^2}{2 \cdot t} \left(\alpha + \frac{1}{150} \right)$$

Dieser Ansatz wurde anhand der Versuchsergebnisse der Serie 1 auch auf seine Gültigkeit für Lagerbeanspruchungen ($\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ bis $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$) überprüft, die außerhalb der derzeit gültigen Bestimmungen liegen. Die Übereinstimmung dieses Ansatzes mit den Versuchsergebnissen zeigen die Bilder A 1 bis A 15, in denen sowohl die in den Versuchen gemessenen wie auch die nach obigem Ansatz errechneten Werte für die Exzentrizität e aufgetragen sind.

9.2 Ergebnisse der Serie 2, Einfluß unterschiedlicher Kontaktflächenrauigkeiten auf das Trag- und Verformungsverhalten

Mit den Versuchen der Serie 2 sollte der Einfluß unterschiedlicher Kontaktflächenrauigkeiten auf das Trag- und Verformungsverhalten unbewehrter Elastomerlager untersucht werden. Dazu wurden für sieben verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten der Betonplatten, die die angrenzenden Bauteile simulierten, mit Lagern der Grundfläche $a \times b = 200 \times 200 \text{ mm}$ und den Dicken $t = 5 \text{ mm}$, $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ jeweils drei Versuche unter $\sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 10,0 \text{ N/mm}^2$ durchgeführt, wobei der Versuchsablauf dem der Serie 1 entsprach. Folgende Kontaktflächen wurden dabei verwendet:

- blanke Kontaktfläche aus Stahl oberhalb und unterhalb des Lagers
- mit Schalöl getränkte, durch Handabzug, entsprechend den Betonplatten der Serie 1 hergestellte Betonoberfläche oberhalb und unterhalb des Lagers

- mit sägerauhem Holz geschalte Betonoberfläche oberhalb und unterhalb des Lagers
- durch Handabzug, je zur Hälfte glatt und zur Hälfte rau, hergestellte Betonoberfläche oberhalb und unterhalb des Lagers; der glatte bzw. rauhe Teil der Betonplatten war jeweils übereinander angeordnet
- mit kunststoffbeschichteter Schalung hergestellte glatte Betonoberfläche oberhalb und unterhalb des Lagers
- wie vor mit kunststoffbeschichteter Schalung hergestellte Betonplatten oberhalb und unterhalb des Lagers, die jedoch nach dem Betonieren in die umgedrehte Lage gebracht worden waren, so daß die ebenfalls glatte Betonoberfläche einige größere Vertiefungen infolge Wasseransammlung auf der nicht saugenden Schaloberfläche aufwies
- durch Handabzug hergestellte Betonoberflächen entsprechend Serie 1; jedoch wurde vor Versuchsbeginn ein Wasserfilm von ca. 2 mm Dicke auf die untere Betonplatte aufgebracht.

Mit den eingesetzten Oberflächen sollten einerseits in der Baupraxis häufig vorkommende Oberflächenbeschaffenheiten erfaßt werden, andererseits sollten jedoch auch die Auswirkungen von Fehlern beim Verlegen der Lager, z. B. das Verlegen auf mit Schalöl getränkte Betonflächen oder das Verlegen bei starkem Regen, untersucht werden. Auf eine genauere Erfassung und Darstellung der Kontaktflächentopographie, als sie durch die obige Beschreibung der verwendeten Oberflächen gegeben ist, wurde im Sinne der baupraktischen Orientierung dieser Arbeit verzichtet. Zwar ist es möglich, die Profilierung der an das Lager angrenzenden Oberflächen durch Profilschnitte zu beschreiben; eine allgemein gültige genauere Aussage über die Kontaktflächentopographie wäre hierdurch jedoch nicht möglich, da hierfür eine größere Anzahl von Profilschnitten erforderlich wäre, die mit Hilfe statistischer Methoden ausgewertet werden müßten. Außerdem lassen die

praxisüblichen Verfahren zur Herstellung bestimmter Betonflächen die Einhaltung labormäßig festgelegter Eigenschaften nicht zu, und eine Reproduzierbarkeit gleicher Oberflächenrauigkeit ist nur in Grenzen, wie sie etwa durch die oben angegebene Oberflächenbeschreibung festgelegt sind, möglich.

9.2.1 Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz}

Die in Tabelle A 16 für Verdrehungswinkel $\alpha = 0,000$ rad und $\alpha = 0,020$ rad mitgeteilten Werte der in den Versuchen gemessenen Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz} und die in den Bildern A 79 und A 82 für alle untersuchten Oberflächen und eine mittlere Pressung von $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ dargestellten Stauchungs-Verdrehungs-Diagramme bestätigen die Bedeutung der Kontaktflächenbeschaffenheit für die Größe der Lagerdeformationen lose verlegter unbewehrter Elastomerlager. So zeigten sich zum Beispiel bei den Versuchen mit $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ dicken Lagern unter einer mittleren Pressung $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ Stauchungsdifferenzen Δf_{zen} zwischen dem kleinsten und dem größten gemessenen Wert von ca. 20 % - bezogen auf die Lagerdicke - und bei 5 mm dicken Lagern von ca. 14 % - bezogen auf die Lagerdicke.

Unterschiede im Verformungsverhalten zeigten sich bei den durchgeführten Versuchen insbesondere zwischen den dünnen ($t = 5 \text{ mm}$) und den dicken Lagern ($t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$) bezüglich jener Kontaktflächenbeschaffenheiten, die zu Minimal- bzw. Maximalwerten der Lagerstauchung führten. Bei den dünnen Lagern ergaben sich zusätzlich folgende Unterschiede zwischen den Versuchen mit einer mittleren Pressung von $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$.

Unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ und ohne Verdrehung des unterstützten Bauteils ($\alpha = 0,000$) ergaben sich die größten Lagerstauchungen bei Einsatz der mit sägerauhem Holz geschalteten Betonplatten. Bezogen auf die Größe der gemessenen Stauchungen lautet die weitere Reihenfolge

der untersuchten Kontaktflächen: mit Handabzug zur Hälfte rauh und zur Hälfte glatt hergestellte Betonfläche, glatte Betonfläche mit Vertiefungen, glatte Betonfläche, blanke Stahlfläche, mit Schalöl getränkte Betonfläche, mit Wasser benetzte Betonfläche. Nachdem zusätzlich zu der Vertikallastbeanspruchung eine Winkelverdrehung von $\alpha = 0,030$ rad aufgebracht worden war, änderte sich diese Reihenfolge bezüglich der gemessenen Stauchungen f_{exz} . Die größten Werte wurden jetzt bei Einsatz der blanken Stahlflächen gemessen, und danach folgten die bei Einsatz mit Schalöl getränkten Betonflächen gemessenen Stauchungen. Die bei Verwendung der mit sägerauhem Holz hergestellten Betonflächen ermittelten Werte f_{exz} waren jetzt vergleichsweise gering und ergaben die zweitniedrigste gemessene Stauchung.

Unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ wurden die größten Lagerstauchungen sowohl unter reiner Vertikalbeanspruchung wie auch unter zusätzlicher Winkelverdrehung bei Einsatz der blanken Stahlflächen gemessen. Die Größe der unter $\alpha = 0,000$ rad und unter $\alpha = 0,020$ rad gemessenen Stauchungen bei Verwendung der mit sägerauhem Holz geschalteten Betonflächen zeigte jedoch unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ die gleiche Tendenz wie unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$, d. h., die Werte lagen im Vergleich zu den unter Verwendung der anderen Kontaktflächen gemessenen Stauchungen bei $\alpha = 0,000$ rad höher als bei $\alpha = 0,030$ rad. Für den Einsatz der mit Schalöl benetzten Betonflächen gilt wiederum die entgegengesetzte Tendenz; hier lagen die gemessenen Stauchungen unter zusätzlicher Winkelverdrehung vergleichsweise höher.

Bei den Versuchen mit $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ dicken unbewehrten Elastomerlagern zeigte sich sowohl unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ wie auch unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ annähernd die gleiche Reihenfolge der untersuchten Kontaktflächen - bezogen auf die Größe der gemessenen Stauchungen. Die mit Abstand größten Werte (siehe Bild A 79 bis A 80) wurden bei diesen Lagerdicken jeweils bei Verwendung der blanken Stahlflächen als Kontaktflächen gemessen.

Aus den auf den Kontaktflächen nach der Versuchsdurchführung festgestellten Verschleißspuren und aus der Größe der gemessenen Lagerstauchungen kann geschlossen werden, daß bei den vorliegenden Versuchen der elastische Anteil der Lagerverformungen, der als Zusammendrückung infolge seitlicher Auswölbung der Lagerränder definiert wird, bei allen verwendeten Kontaktflächen annähernd gleich groß ist und daß der elastische Verformungsanteil an der gesamten Lagerstauchung geringer ist als der Gleitanteil, der durch Vergrößerung der Lagerfläche entsteht. Die gemessenen Stauchungsdifferenzen können somit im wesentlichen durch die unterschiedliche Größe des Gleitanteils an den Lagerverformungen erklärt werden und erlauben damit folgende Feststellungen bezüglich der Querdehnungsbehinderung in den untersuchten Kontaktflächen:

- Blanke Stahlplatten führen zu einer erheblichen Vergrößerung der Lagerstauchungen im Vergleich zu rauheren Kontaktflächen.
- Ein Wasserfilm bzw. eine mit Schalöl getränkte Oberfläche bewirken auch bei rauheren Kontaktflächen eine Verminderung der Reibung und führen somit zu einer Stauchungszunahme. Bei dünnen Lagern ($t = 5 \text{ mm}$) trat dieser Effekt unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ erst bei Lastkonzentration infolge Winkelverdrehung des unterstützten Bauteils bzw. unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ auf. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ein Teil des Wassers bzw. des Schalöls in das Porensystem des Betons gepreßt wurde und daß bei dünnen Lagern unter niedrigen Pressungen kein vollständiger Formschluß zwischen Elastomer und Kontaktfläche stattfindet, so daß sich der Rest der aufgetragenen Flüssigkeiten in den verbleibenden Hohlräumen ansammeln konnte.

- Mit trägerauhem Holz geschaltete Betonflächen zeigten bei dünnen Lagern ($t = 5 \text{ mm}$) keinen günstigen Einfluß auf die Größe der Lagerzusammendrückungen. Bei den dickeren Lagern ($t = 10 \text{ mm}$, $t = 20 \text{ mm}$) war dies jedoch der Fall; hier führte die größere Rauhigkeit zu einer erheblichen Querdehnungsbehinderung und damit zu vergleichsweise geringen Stauchungen. Dieser Unterschied deutet darauf hin, daß bei den dicken Lagern ein nahezu vollständiger Formschluß zwischen Elastomer und rauher Kontaktfläche stattfindet, der vor Beginn der Gleitbewegung überwunden werden muß. Es liegt somit nicht ausschließlich Reibung, sondern auch Scherung vor.
- Die übrigen untersuchten Betonflächen zeigten keine nennenswerten Stauchungsunterschiede. Auch ein Vergleich mit den im Rahmen der Serie 1 ermittelten Werte f_{zen} und f_{exz} , bei denen durch Handabzug hergestellte Betonflächen verwendet wurden, ergab eine gute Übereinstimmung. Für in der Baupraxis übliche geglatzte Betonflächen kann somit von einer annähernd gleichen Querdehnungsbehinderung ausgegangen werden. Auch einzelne Vertiefungen, die sicherlich örtlich zu einem Formschluß zwischen Elastomer und Betonfläche führen, blieben ohne größere Auswirkungen.

9.2.2 Horizontalverschiebungen w

Die in den Bildern A 83 bis A 103 in Abhängigkeit von der Vertikalbelastung V dargestellten Verschiebungen w der Elastomerlager bestätigen die bereits unter 9.2.1 aufgrund der unterschiedlichen Lagerstauchungen mitgeteilten Ergebnisse bezüglich der Bewegungswiderstände bzw. des Gleitverhaltens bei den verschiedenen im Rahmen dieser Serie verwendeten Kontaktflächen. Der in diesen Bildern parallel zur Abszisse verlaufende Kurvenabschnitt gibt wie bei den Diagrammen der Serie 1 die Verschiebungen an, die

sich nach dem Aufbringen der Vertikallast bei zusätzlicher Verdrehung des unterstützten Bauteils infolge der hierdurch auftretenden Horizontalkomponente einstellten. Die nach der Entlastung gemessene Horizontalverschiebung w kann wiederum als Gleitanteil v angesehen werden. Damit ergeben sich folgende Feststellungen:

- Bei Verwendung blanker Stahlplatten als Kontaktflächen wurden insbesondere bei den Lagern mit Dicken von $t = 5 \text{ mm}$ und $t = 10 \text{ mm}$ erhebliche Horizontalverschiebungen gemessen. Der Gleitanteil v war hier im Vergleich zu dem Anteil der elastischen Verformung u an den gemessenen Relativverschiebungen etwa um das Drei- bis Sechsfache größer. Im Gegensatz dazu führte die größere elastische Verformbarkeit der 20 mm dicken Lager zu einer deutlichen Abnahme der Gleitbewegungen (siehe Bild A 85). Unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ reichte die Adhäsion zwischen Elastomer und Stahl sogar für eine fast vollständige Gleitbehinderung.
- Auch bei Einsatz mit schalöl getränkter Betonplatten als Kontaktflächen wurden noch deutliche Gleitbewegungen festgestellt (siehe Bilder A 86 bis A 88). Die Größenordnung des Gleitanteils v und des Anteils der elastischen Verschiebung u sind bei den $t = 5 \text{ mm}$ und $t = 10 \text{ mm}$ dicken Lagern etwa gleich. Die größere elastische Verformbarkeit der $t = 20 \text{ mm}$ dicken Lager führt wiederum zu einer Verringerung der Gleitbewegungen.
- Die Untersuchung des Einflusses der weiteren verschiedenen Betonflächen zeigte durchweg eine deutliche Abnahme des Gleitanteils v an den Horizontalverschiebungen w bei allen Lagerdicken. Auch die Verwendung der wasserbenetzten Betonfläche führte zu keiner überproportionalen Vergrößerung der Verschiebung w infolge der Horizontalkomponente

aus der Winkelverdrehung des gestützten Bauteils. Die reibungsmindernde Wirkung eines Wasserfilms wirkt vermutlich nur kurzzeitig bei der ersten Belastung eines Lagers. Danach wird das Wasser entweder seitlich weggedrückt oder in das Porensystem des Betons hineingedrückt.

9.2.3 Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft

Der Einfluß unterschiedlicher Kontaktflächenrauigkeiten auf die Größe der Exzentrizität e ergibt sich bei den durchgeführten Versuchen durch den Anteil der Horizontalverschiebung w an der Lastmitte der Vertikallasten F_1 , F_3 und F_4 (siehe Abschnitt 7, Seite 18 ff.). Entsprechend den unter 9.2.2 mitgeteilten Ergebnissen ist daher bei Kontaktflächen mit geringem Bewegungswiderstand - wie z. B. blanken Stahlplatten oder mit Schalöl benetzten Betonplatten - mit einer Vergrößerung der Exzentrizität e gegenüber Kontaktflächen mit größeren Bewegungswiderständen zu rechnen.

Ein Vergleich der in Tabelle A 16 zusammengestellten Werte für die Exzentrizität e bestätigt diese Aussage nicht. Die Bilder A 61 bis A 78, in denen die Exzentrizität in Abhängigkeit von der Verdrehung dargestellt ist, zeigen, daß dies auf die bereits in der Grundeinstellung ($\alpha = 0,000$ rad) vorhandenen ungewollten Exzentrizitäten zurückzuführen ist, die trotz großer Sorgfalt bei der Versuchsdurchführung nicht vermieden werden konnten.

9.3 Ergebnisse der Serie 3, Einfluß gleichzeitiger Vertikal- und Horizontallastbeanspruchung

Mit den im Rahmen der Serie 3 durchgeführten Versuchen sollte neben der Untersuchung des Einflusses gleichzeitiger Vertikal- und Horizontalbeanspruchungen auf das Trag- und Verformungsverhalten unbewehrter, lose verlegter Elastomerlager auch die Größe der ohne Gleitbewegungen aufnehmbaren Horizontalkraft abgeschätzt werden.

Entsprechend dieser Zielsetzung wurden verschiedene Lagerabmessungen sowohl unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ wie auch unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ untersucht. Bei allen Versuchen wurde dabei zunächst die Vertikallast in vier gleichen Stufen aufgebracht. Danach erfolgte die Horizontalbelastung in ebenfalls vier gleichen Stufen, und anschließend wurde der Verdrehungswinkel zwischen dem stützenden und dem aufliegenden Bauteil bis auf $\alpha = 0,030 \text{ rad}$ gesteigert. Bei den Versuchen mit einer mittleren Spannung von $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ wurde nach Rücknahme der Verdrehung unter Beibehaltung der Vertikallast in einem 2. Belastungszyklus die H-Kraft gesteigert und dann wiederum die Verdrehung aufgebracht. Eine detaillierte Übersicht und eine Zusammenstellung des Versuchsprogramms der Serie 3 enthält die Tabelle A 4.

Die Größe der im ersten Belastungszyklus aufgebrachten Horizontalkraft entsprach in etwa den durch die Begrenzung der Schubverformung auf $\tan \gamma = 0,7$ gegebenen Werten (Deformationskriterium siehe Tabelle A 14). Die im zweiten Belastungszyklus aufgebrachte Horizontalkraft war etwa doppelt so groß.

Die Laststeigerungen der Horizontalkraft von einer Laststufe zur nächsten wurden jeweils in etwa 1 bis 1,5 min aufgebracht, und die Standzeit zwischen den einzelnen Laststufen betrug etwa 1 bis 2 min.

9.3.1 Horizontalverschiebungen w und aufnehmbare Zwangsbeanspruchungen

Die horizontale Verschiebung w lose verlegter Elastomerlager setzt sich, wie bereits unter 9.1.2 erläutert, aus einem elastischen Verformungsanteil u und einem Gleitweg in der Kontaktfläche v zusammen (vgl. Bild 2 in /1/):

$$w = u + v$$

Auf der Grundlage der von Topaloff in / 42 / beschriebenen theoretischen Zusammenhänge ergibt sich der folgende bereits in /1/ mitgeteilte Zusammenhang zwischen Horizontalkraft und elastischem Verformungsanteil u:

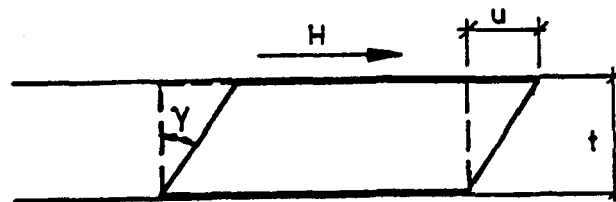


Bild 10: Elastische Lagerverformung u infolge Horizontalkraftbeanspruchung

$$u = \gamma \cdot t = \frac{H+V \cdot \alpha/2}{A \cdot G} \cdot t$$

Um eine Aussage treffen zu können, ab wann bei den durchgeführten Versuchen Gleitbewegungen in den Kontaktflächen auftraten, wurden die Versuchswerte w mit den nach obigem Ansatz erwarteten rechnerischen elastischen Verformungen verglichen. Die Mittelwerte der Quotienten aus dem Versuchswert und dem rechnerischen Wert wurden in Abhängigkeit von den Lagerabmessungen und der mittleren Vertikalspannung für die Laststufen, bei denen die Horizontalkraft bis auf den im 1. Belastungszyklus angestrebten Wert gesteigert wurde, in Tabelle 3 angegeben.

Elastomerlager		$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$	
Abmessungen					
t mm	a x b mm x mm	x_m	Standard- abweichung	x_m	Standard- abweichung
5	200 x 200	2,013	0,582	1,458	0,186
10		1,437	0,353	0,932	0,044
20		0,935	0,244	0,566	0,149
10	200 x 100	1,033	0,420	-	-
10	100 x 200	1,514	0,661	0,671	0,261

Tabelle 3: Mittelwerte x_m der Quotienten aus den gemessenen Verschiebungen w und der rechnerisch erwarteten elastischen Verformung u für die Laststufen, in denen die Horizontalkraft aufgebracht wurde ($\alpha = 0,000 \text{ rad}$)

Die Werte der Tabelle 3 deuten bei den d ü n n e n L a g e r n ($t = 5 \text{ mm}$) auf große Differenzen zwischen den Versuchswerten und den rechnerisch erwarteten elastischen Verformungen hin. Ein Vergleich der in Tabelle A 17 mitgeteilten, in den Versuchen gemessenen Verschiebungen w zeigt, daß bei Lagern der Dicke $t = 5 \text{ mm}$ unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ bereits bei $H = 14,7 \text{ kN}$ ($\sim 0,07 \text{ V}$) erhebliche Verschiebungen ($w = 3,668 \text{ mm}$) auftreten, die nicht mehr ausschließlich mit elastischen Verformungen des Elastomers aufgenommen werden können und somit bereits zu Relativbewegungen in den Kontaktflächen führen. Unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ wurde bei $H = 14,5 \text{ kN}$ eine gute Übereinstimmung zwischen Versuchswert und rechnerischem Wert festgestellt; bereits bei $H = 29,1 \text{ kN}$ ($\sim 0,07 \text{ V}$) traten jedoch wiederum Bewegungen in der Kontaktfläche auf.

Auch bei den $t = 10 \text{ mm}$ d i c k e n L a g e r n wurden unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ schon vor Erreichen der durch das Deformationskriterium ($\tan \gamma \leq 0,7$) festgelegten Horizontalkraft Relativverschiebungen gemessen, bei denen ein Gleitanteil v ent-

halten ist. Die nur durch elastische Verformungen aufnehmbare Horizontalkraft kann für die mit 10 mm dicken Lagern für verschiedene Lagerflächen durchgeführten Versuche unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ zu ca. $H = 0,1 \text{ v}$ angegeben werden. Auch unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich die aufnehmbare Horizontalbelastung zu etwa $H = 0,1 \text{ v}$ bzw. $H = 0,12 \text{ v}$ bei diesen Lagerabmessungen.

Bei den $t = 20 \text{ mm}$ dicken Lagern führte die größere elastische Verformbarkeit zu einer weiteren Steigerung des ohne Gleitbewegungen aufnehmbaren Horizontallast. Unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ wurden jetzt Werte von ca. $H = 0,1 \text{ v}$ und unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ Werte von ca. $H = 0,15 \text{ v}$ ohne Gleitbewegungen aufgenommen.

Folgende Feststellungen können aufgrund der durchgeführten Versuche für die Verschiebungswege w der untersuchten Lager getroffen werden:

- Bei allen Lagern zeigte sich beim Aufbringen der Verdrehung bereits im ersten Belastungszyklus eine deutliche Zunahme der Horizontalverschiebung. Dies ist vermutlich weniger auf die durch Schiefstellung des aufliegenden Bauteils auftretende Horizontalkomponente der Vertikallast, die zu einer Vergrößerung der gesamten Horizontalkraft beiträgt, zurückzuführen als vielmehr auf die Verringerung des Bewegungswiderstandes in der Kontaktfläche. Zwar bewirkt die Verdrehung eine Spannungskonzentration an dem stärker gedrückten Rand und damit auch eine Erhöhung der Reibungszahl bzw. des Bewegungswiderstands in diesem örtlich begrenzten Bereich. Die Größe der Verschiebungszunahme deutet jedoch eindeutig darauf hin, daß der auf die gesamte Kontaktfläche bezogene Bewegungswiderstand bei Verdrehung bereits vor dem Auftreten einer klaffenden Fuge abnimmt.
- Die Gleitbewegungen in den Kontaktflächen wurden insbesondere bei den dünnen Lagern, unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ im zweiten Belastungszyklus jedoch auch bei den dickeren Lagern, von einem

Abheben der Lagerenden und bei größeren Wegen von einem Abrollen der Lager begleitet.

- Bei keinem der untersuchten Lager wurden nach der Versuchsdurchführung stärkere Verschleißerscheinungen festgestellt. Lediglich bei den $t = 20$ mm dicken Lagern wies die Oberfläche nach den Versuchen unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ eine gewisse Welligkeit auf, die auf "inneren Walkverschleiß" schließen läßt. Eine einmalige Bewegung kann jedoch in bezug auf den Verschleiß als unbedenklich angesehen werden, selbst wenn starke Abrollbewegungen stattgefunden haben. Mehrmalige Bewegungszyklen unter großer Horizontalkraft haben dagegen vermutlich bei allen Lagerdicken einen "inneren Walkverschleiß" zur Folge.

9.3.2 Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz} und Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft

Infolge Horizontalkraftbeanspruchung ist bei Elastomerlagern die bereits in Bild 10 dargestellte Verzerrung zu erwarten. Die Zunahme der Lagerstauchungen f_{zen} , die die in der Tabelle A 17 mitgeteilten Versuchswerte unter zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung ausweisen, können somit nicht mit den elastischen Verformungen u erklärt werden, da sich hierdurch keine Änderung der Höhe t ergibt.

Diese Stauchungszunahme beim Aufbringen der Horizontalkraft ist vielmehr auf die bereits unter 9.3.1 beschriebenen Gleitbewegungen zurückzuführen. Hierdurch ergibt sich eine Abminderung der Querdehnungsbehinderung in den Kontaktflächen, die bei unbewehrten Lagern eine Vergrößerung des Ausbreitmaßes der Lagerfläche und damit auch der Stauchung zur Folge hat.

Eine eindeutige Aussage über die Größe der Stauchungszunahme läßt sich aus den vorliegenden Versuchsergebnissen nicht ableiten, da die mit den Relativverschiebungen auftretenden Abrollbe-

wegungen zu einer gegenläufigen Tendenz führen und bei großen relativverschiebungen sogar eine Verringerung der Stauchung bewirken.

Die unter zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung beobachteten Exzentrizitätsänderungen der resultierenden Lagerkraft entsprechen grob geschätzt den gemessenen Verschiebungswegen w :

$$e_{(H)} \sim w$$

Abweichungen von dieser Beziehung ergaben sich durch ungewollte geringfügige Schwankungen der Vertikallast und der Verdrehung zwischen zwei Laststufen.

9. Ergebnisse der Serie 4, Langzeitverhalten

Das zeitabhängige Verformungsverhalten von Elastomerlagern ist in der Literatur bereits mehrfach ausführlich beschrieben worden. Eine Übersicht geben Abschnitt 2.2 des vorliegenden Berichts und Abschnitt 2.3.4 in /1/. Die im Rahmen der Serie 4 durchgeführten Versuche sollten vor allem Aussagen über die zeitabhängige Zunahme der Lagerstauchung ermöglichen und damit auch zu einer Ergänzung der in der Literatur (/11/, /14/, /24/, /27/ und /29/) mitgeteilten Ergebnisse beitragen. Dies erschien sinnvoll und notwendig, da die gesuchten Angaben zum Langzeitverhalten von Elastomerlagern bisher überwiegend an Chloropren-Werkstoffen gewonnen wurden und daher wegen der Abhängigkeit der Kriechneigung von der Kautschukart bzw. der Gummimischung nicht ohne weiteres auf die hier untersuchten EPDM-Lager übertragbar sind. Darüber hinaus sind nicht alle bekannten Kriechbeiwerte vergleichbar, da die elastische Verformung, auf die sie bezogen wurden, entweder nicht bekannt oder unterschiedlich definiert ist. Üblicherweise wird das auf die fünf Minuten nach Belastungsende erreichte elastische Verformung bezogene Verhältnis der Kriechverformungen heute als Kriechbeiwert elastomerer Werkstoffe angegeben.

Die Messung von Kriechverformungen erfordert eine konstante Spannung. Bei den durchgeführten Versuchen ergab sich aus dieser Forderung die Notwendigkeit, die mittels Öldruckpressen aufgebrachte Vertikallast in Abständen von ca. 15 Minuten zu korrigieren, da die zeitabhängigen Verformungen zu einem Abfall des Öldrucks führten. Der mit der erforderlichen Korrektur verbundene Zeitaufwand bei der Versuchsdurchführung und die insgesamt zur Verfügung stehende Zeit bedingten leider eine Beschränkung der Versuchsdauer auf etwa 3 Stunden. Obwohl elastomere Werkstoffe einen kürzeren Kriechverlauf aufweisen als beispielsweise Beton, erlaubt ein so kurzer Zeitraum lediglich Aussagen über das Anfangskriechen und keine Abschätzung der Endkriechzahl. Wegen dieser Einschränkungen erschien es sinnvoll, das Versuchsprogramm nicht allzusehr auszuweiten und auf die in Tabelle A 5 angegebenen Versuche zu beschränken.

Die mittlere Raumtemperatur lag bei allen Versuchen der Serie 4 bei rund $19^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Größere Temperaturschwankungen traten im Verlauf der einzelnen Versuche nicht auf.

Bei den Versuchen 4.1 bis 4.6 wurde die Vertikallast in 4 gleichen Laststufen aufgebracht. Danach wurde in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005$ rad die Verdrehung des aufliegenden Bauteils auf $\alpha = 0,03$ rad gesteigert. Der Zeitraum für das Aufbringen der Belastung und der Winkelverdrehung betrug bei diesen Versuchen im Mittel $30 \text{ Minuten} \pm 3 \text{ Minuten}$.

Bei den Versuchen 4.7 und 4.8 wurde die Vertikallast und die Winkelverdrehung nacheinander in je einem Schritt aufgebracht. Hierfür wurden im Versuch 4.7 10 Minuten und bei Versuch 4.8 13 Minuten benötigt.

Die gleichzeitige Lagerbeanspruchung aus einer Vertikallast und aus Winkelverdrehung wurde bei den vorliegenden Versuchen gewählt, um einen Vergleich zu den im Rahmen der anderen Serien durchgeführten Versuche zu ermöglichen. Da durch die Winkelverdrehung eine Lastkonzentration am stärker gedrückten Rand ent-

steht, ergibt sich hieraus zwangsläufig ein unterschiedliches Kriechverhalten in der Lagermittelachse und in der Achse der exzentrisch angreifenden Normalkraft. Dementsprechend wurden Kriechmaße $\varphi_{192 \text{ min}}$ sowohl aus den Lagerstauchungen f_{zen} in der Lagerachse wie auch aus den Lagerstauchungen f_{exz} in der Achse des Lastangriffs nach folgender Beziehung ermittelt:

$$\varphi_{192 \text{ min}} = \frac{\epsilon_{192 \text{ min}} - \epsilon_0}{\epsilon_0}$$

Dabei ist ϵ_0 die fünf Minuten nach Belastungsende gemessene elastische Verformung.

Die Kriechbeiwerte $\varphi_{192 \text{ min}}$ wurden aus den in Tabelle A 18 mitgeteilten Lagerstauchungen ermittelt und sind in Tabelle 4 für alle Versuche zusammengestellt. Die Zunahme der Lagerstauchung in Abhängigkeit von der Zeit ist in den Bildern A 135 bis A 138 aufgetragen.

Versuch Nr.	t mm	a x b mm x mm	σ_m N/mm ²	φ_{192} in der Lagerachse	φ_{192} in der Achse des Lastangriffs
4.1	10	200x200	5,0	0,23	0,05
4.2			10,0	0,16	0,10
4.3	20	200x200	5,0	0,06	0,05
4.4			10,0	0,04	0,035
4.6	10	200x100	20,0	0,03	0,01
4.7	20	200x200	5,0	0,075	0,048
4.8			10,0	0,045	0,025

Tabelle 4: Kriechbeiwerte in der Lagerachse und in der Achse des Lastangriffs für die Versuche der Serie 4

Die Tabelle 4 läßt erkennen, daß die Kriechbeiwerte in der Achse des Lastangriffs - also in dem infolge der Winkelverdrehung höher beanspruchten Bereich - durchweg erheblich geringer sind als in der Lagerachse. Darüber hinaus ergaben die an einem Lager unter höherer Pressung durchgeführten Versuche in der Regel kleinere Kriechbeiwerte als die unter niedrigerer Pressung gefahrenen Versuche. Hierdurch wird die bereits von Schorn in /29/ getroffene Feststellung bestätigt, daß mit größerer Anfangsverformung, die durch größere Anfangsbelastung bedingt ist, das Kriechmaß absinkt.

Ein Vergleich der Kriechbeiwerte aus den Versuchen 4.3 und 4.4 (geringe Belastungsgeschwindigkeit) mit den Kriechbeiwerten aus den Versuchen 4.7 und 4.8 (höhere Belastungsgeschwindigkeit) läßt keinen eindeutigen Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die Größe des Kriechmaßes erkennen. Die Werte deuten allerdings darauf hin, daß dem Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf die absolute Größe der Kriechbeiwerte keine allzu große Bedeutung beigemessen werden muß. Dies wird auch durch Flohrer in /14/ bestätigt. Er gibt ebenfalls aufgrund von Kurzzeitversuchen an, daß der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit maximal 5 % beträgt.

Auf die Berechnung von Kriechbeiwerten infolge Schubverformung aus den Horizontalverschiebungen w wurde verzichtet, da bei den durchgeführten Versuchen eine Gleitbewegung in den Kontaktflächen auch fünf Minuten nach dem Aufbringen der Belastung nicht ausgeschlossen werden kann. Solche Gleitbewegungen, die z. B. durch Spannungsumlagerungen infolge Kriechens auch nach zeitweisem Stillstand wieder einsetzen können, beeinflussen das Ergebnis insbesondere bei den hier vorliegenden Kurzzeitversuchen erheblich.

9.5 Versuchsergebnisse der Serie 5, Mehrfachbelastung

In den Versuchen der Serie 5 wurde zuerst die angestrebte vertikale Belastung in vier jeweils gleichen Stufen aufgebracht. Danach wurde das aufliegende Bauteil in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005$ rad bis zu einem Winkel von $\alpha = 0,03$ rad verdreht. Nach Erreichen dieser Winkelverdrehung wurde die Verdrehung in Schritten von $\Delta\alpha = 0,01$ rad zurückgefahren und das Lager wiederum in 4 Stufen belastet. Dieser Belastungs- und Verdrehungsvorgang wurde in jedem Versuch dreimal wiederholt.

Mit dieser Versuchsdurchführung sollte die Änderung des Verformungsverhaltens unbewehrter Elastomerlager bei wiederholter Beanspruchung untersucht werden.

Den in den Bildern A 139, A 142, A 145, A 148, A 151, A 154, A 157, A 160 und A 163 in Abhängigkeit von der Winkelverdrehung α dargestellte Verlauf der Exzentrizität e zeigt, daß der Einfluß wiederholter Beanspruchungen auf die Größe der resultierenden Lagerausmitte bei allen untersuchten Lagern gering bleibt. Die unter einem Verdrehungswinkel $\alpha = 0,03$ rad zwischen dem ersten und dem dritten Belastungszyklus festgestellte Abweichung betrug maximal 5,2 %. Im übrigen gelten die bereits in Abschnitt 9.1.3 dieses Berichts bezüglich der Exzentrizität getroffenen Aussagen auch für die Versuche der Serie 5.

Die im Rahmen der Serie 5 innerhalb des ersten Belastungszyklus gemessenen Lagerstauchungen f_{zen} wurden wie die Ergebnisse der Serie 1 mit den bereits in Abschnitt 9.1.1 aufgeführten Berechnungsvorschlägen (1) und (2) verglichen. Auf eine Darstellung dieses Vergleichs wird hier verzichtet, da die bereits in den Tabellen 1 und 2 mitgeteilten Werte voll bestätigt wurden und die in Abschnitt 9.1.1 getroffenen Aussagen zu Abweichungen bzw. Übereinstimmungen mit den Berechnungsvorschlägen (1) und (2) auch für die Lagerstauchungen des ersten Belastungszyklus der Versuche 5.1 bis 5.9 gelten.

Versuch Nr.	t mm	a x b mm x mm	σ_m N/mm ²	X_{m_z}	S	X_{m_e}	S
5.1	5	200x200	5,0	1,21	0,02	1,08	0,05
5.2			10,0	1,11	0,01	1,08	0,03
5.3	10		5,0	1,17	0,04	1,11	0,06
5.4			10,0	1,09	0,02	1,07	0,02
5.5	20		5,0	1,08	0,04	1,06	0,03
5.6			10,0	1,11	0,02	1,09	0,01
5.7	10	200x100	5,0	1,20	0,05	1,13	0,06
5.8			10,0	1,14	0,03	1,12	0,03
5.9			20,0	1,16	0,01	1,12	0,02

X_{m_z} : Mittelwert aus $\frac{f_{zen} \text{ 3. Belastungszyklus}}{f_{zen} \text{ 1. Belastungszyklus}}$

X_{m_e} : Mittelwert aus $\frac{f_{exz} \text{ 3. Belastungszyklus}}{f_{exz} \text{ 1. Belastungszyklus}}$

S : Standardabweichung

Tabelle 5: Mittelwerte der Quotienten aus den Lagerstauchungen des 3. Belastungszyklus und des 1. Belastungszyklus für $\alpha = 0,0$; $\alpha = 0,010$; $\alpha = 0,020$ und $\alpha = 0,030$ rad

Die in der Tabelle 5 zusammengestellten Werte lassen erkennen, daß die Lagerstauchungen im dritten Belastungsvorgang deutlich über denen des ersten Belastungsvorgangs liegen. Dabei ist die Steigerung der in der Lagerachse gemessenen Werte f_{zen} etwas größer als die Steigerung der in der Achse der ausmittig angreifenden Vertikalkraft gemessenen Werte f_{exz} . Dies war zu erwarten, da die Stauchungen f_{exz} in dem infolge Winkelverdrehung höher belasteten Bereich des Lagers gemessen wurden und da hier wegen

der örtlich erhöhten Pressung bereits im ersten Belastungszyklus größere Stauchungen erwartet werden mußten.

Die Bilder des Anhangs A, die für die Serie 5 den Verlauf der Lagerstauchungen in Abhängigkeit von der Winkelverdrehung angeben, und die Tabelle A 19 zeigen, daß der größte Anteil der Stauchungszunahme bereits im ersten Belastungszyklus nach dem Aufbringen der Belastung und der Verdrehung beim Zurückfahren der Verdrehung auftritt. Während der nachfolgenden Belastungs- und Verdrehungsvorgänge wurde lediglich eine vergleichsweise geringe Stauchungszunahme gemessen. Diese Feststellung deutet auf eine Abnahme der Querdehnungsbehinderung (siehe auch Abschnitt 9.1.1) in den Kontaktflächen hin, die einerseits durch Rauigkeitsänderungen der Betonflächen infolge seitlicher Ausdehnungen des Lagers und andererseits durch Aufhebung des Formschlusses des in die Vertiefungen der Betonfläche gepreßten Elastomers infolge Spannungsumlagerungen bei Änderungen der Winkelverdrehungen entsteht.

Der hier beschriebenen Abnahme der Querdehnungsbehinderung des Lagers kann der entscheidende Einfluß auf die Stauchungszunahme beigemessen werden. Sie ist vergleichbar mit der in der Literatur (/14/, /21/, /38/) als "Regenwurmeffekt" bezeichneten Abnahme der Reibungszahl unter pulsierender Belastung, die z. B. zur Verringerung einer aufgebrachten Schubverformung beiträgt und zur Änderung der Exzentrizität. Bei den vorliegenden Versuchen wurde dementsprechend eine Vergrößerung der Horizontalverschiebung w infolge der Schubbeanspruchung aus der Winkelverdrehung nach dem ersten Belastungszyklus gemessen (siehe Tabelle A 19).

9.6 Versuchsergebnisse der Serie 6, Mehrfachverdrehung

Die Versuchsdurchführung der Serie 6 begann mit dem stufenweisen Aufbringen der Vertikallast. Danach wurde das aufliegende Bauteil unter konstanter mittlerer Spannung zwischen den Werten $\alpha = + 0,03$ rad und $\alpha = - 0,03$ rad schrittweise dreimal verdreht.

Die im ersten Verdrehungszyklus gemessenen Lagerstauchungen wurden wiederum mit den in Abschnitt 9.1.1 aufgeführten Berechnungsvorschlägen (1) und (2) zur Ermittlung der Lagerstauchung verglichen. Dabei wurden die in diesem Abschnitt aufgrund der Versuchsergebnisse der Serie 1 getroffenen Aussagen bestätigt.

Vers. Nr.	t mm	a x b mm x mm	σ_m N/mm ²	X_{m_z}	S	X_{m_e}	S
6.1	5	200 x 200	5,0	1,89	0,73	1,21	0,06
6.2			10,0	1,50	0,27	1,23	0,05
6.3	10		5,0	1,52	0,05	1,37	0,15
6.4			10,0	1,36	0,09	1,31	0,12
6.5	20		5,0	1,28	0,09	1,27	0,11
6.6			10,0	1,12	0,03	1,11	0,03
6.7	10	200 x 100	5,0	1,44	0,03	1,32	0,12
6.8			10,0	1,31	0,05	1,24	0,09
6.9			20,0	1,22	0,06	1,19	0,07
6.10	10	100 x 200	5,0	1,37	0,10	1,33	0,13
6.11			10,0	1,17	0,08	1,17	0,05
6.12			20,0	1,15	0,04	1,16	0,03

S: Standardabweichung

X_{m_z} : Mittelwert aus $\frac{f_{zen} \text{ 3. Verdrehungszyklus}}{f_{zen} \text{ 1. Verdrehungszyklus}}$

X_{m_e} : Mittelwert aus $\frac{f_{exz} \text{ 3. Verdrehungszyklus}}{f_{exz} \text{ 1. Verdrehungszyklus}}$

Tabelle 6: Mittelwerte der Quotienten aus den Lagerstauchungen des 3. Verdrehungszyklus und des 1. Verdrehungszyklus für $\alpha = 0,0$; $\alpha = 0,01$; $\alpha = 0,02$ und $\alpha = 0,03$ rad

Die Mittelwerte der Tabelle 6 zeigen eine deutliche Zunahme der Lagerstauchungen zwischen dem ersten und dem dritten Verdrehungszyklus. Im Vergleich zu den bereits in den Versuchen der Serie 5 gemessenen Stauchungszunahmen, bei denen das Lager zwischendurch entlastet wurde, ist die Vergrößerung der Lagerzusammendrückung hier um ca. 15 % - 20 % höher. Die im Anhang A enthaltenen Stauchungs-Verdrehungsdiagramme für die Serie 6 und die in der Tabelle A 20 mitgeteilten Werte machen deutlich, daß der größte Anteil der Stauchungszunahme bereits im ersten Verdrehungszyklus beim Zurückfahren der Verdrehung von $\alpha = + 0,030$ rad auf $\alpha = 0,000$ rad entsteht. Die Zunahme zwischen dem zweiten und dem dritten Verdrehungszyklus betrug nur noch etwa 15 - 20 % der Zunahme, die zwischen dem ersten und dem dritten Verdrehungszyklus gemessen wurde.

Die gemessenen Stauchungszunahmen sind wie bei den Versuchen der Serie 5 (siehe Abschnitt 9.5) mit einer Verringerung der Reibungszahl und damit der Querdehnungsbehinderung in den Kontaktflächen erklärbar. Infolge der konstanten Vertikalbelastung genügt die verbleibende Querdehnungsbehinderung jedoch, um eine Rückverformung zwischen den Verdrehungszyklen zu verhindern, so daß sich die oben angesprochene, gegenüber der Serie 5 erhöhte Zunahme der Lagerzusammendrückung einstellt.

Die ebenfalls im Anhang A enthaltenen Exzentrizitäts-Verdrehungsdiagramme für die Versuche der Serie 6 zeigen, daß die mehrfache Verdrehung kaum Einfluß auf die Größe der Exzentrizität hat und daß der Kurvenverlauf des ersten Verdrehungszyklus nahezu identisch mit dem des dritten Verdrehungszyklus ist.

Nennenswerte Änderungen der Horizontalverschiebung w aus der durch die Winkelverdrehung entstehenden Schubbeanspruchung wurden lediglich bei den Lagern mit den Abmessungen 5 bzw. 10 x 200 x 200 mm zwischen der ersten und der dritten Verdrehung festgestellt. Die in der Tabelle A 20 für $\alpha = 0,03$ rad und $\alpha = - 0,03$ rad angegebenen Größen der Horizontalverschiebung w deuten darauf hin, daß bei diesen Lagern eine Gleitbewegung in

den Kontaktflächen stattgefunden haben muß. Demgegenüber ergaben sich bei den Versuchen 6.5 bis 6.12 nur geringfügige Änderungen der Horizontalverschiebung w , obwohl auch bei Versuch 6.12 unter $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ sicher Gleitbewegungen stattgefunden haben. Die bereits in Abschnitt 9.1.2 getroffenen Feststellungen gelten auch bei mehrfacher Verdrehung und wurden durch die Versuche der Serie 6 bestätigt.

9.7 Versuchsergebnisse der Serie 7, Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchung

Bereits in den vorigen Abschnitten wurde darauf hingewiesen, daß eine Winkelverdrehung α des aufliegenden Bauteils eine Horizontalkomponente H aus der Vertikallast V ergibt.

$$H = V \cdot \frac{\alpha}{2}$$

Hierdurch entstehen Schubverformungen, die gelegentlich als "Kirschkerneffekt" bezeichnet werden (/24/, /21/, /43/).

Ihre Größe ergibt sich zu:

$$\tan \gamma = \frac{\sigma \cdot \alpha}{2 \cdot G}$$

$$u = \tan \gamma \cdot t$$

Da aus der Literatur nur sehr wenige Versuche bekannt sind, die den Einfluß von Auflagerverdrehungen untersucht haben, sollten im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch zu diesem Thema einige Versuche durchgeführt werden. Insbesondere zum Einfluß der Reihenfolge der Lagerbeanspruchung sollte die Serie 7 eine Aussage liefern. Nachdem bei den Serien 1 bis 6 jeweils die Vertikalbelastung zuerst aufgebracht wurde und danach unter konstanter mittlerer Spannung σ_m die Winkelverdrehung, wurde jetzt zuerst eine Winkelverdrehung von $\alpha = 0,015 \text{ rad}$ aufgebracht und danach die Vertikallast V in Stufen von $\Delta V = 40 \text{ kN}$.

Auch im Sinne der baupraktischen Fragestellung dieses Forschungsvorhabens erschien es wünschenswert, einige Versuche mit der in der Serie 7 gewählten Beanspruchungsfolge durchzuführen, da bei Auflagerungen im Bauwesen zumindest der ungewollte Anteil der Auflagerverdrehung, z. B. als Folge von Herstellungsungenauigkeiten im Lagerbereich, jeweils sofort vorhanden ist.

Ein Vergleich der nach der o. g. theoretischen Ableitung ermittelten Lagerverformungen u mit in den Versuchen der Serie 7 gemessenen Werten ermöglicht die Tabelle 7, in der darüber hinaus auch die vergleichbaren in der Serie 1 gemessenen Horizontalverschiebungen w angegeben sind.

Abmessungen		vertikale Belastung							
S7	a x b mm x mm	$\sigma_m = 2 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 4 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$			
		w_{S7}	u_{rechn}	w_{S7}	u_{rechn}	w_{S1}	w_{S7}	u_{rechn}	w_{S1}
10	200x200	2,116	0,15	2,531	0,3	-	2,791	0,375	1,736
10		2,400	0,15	3,424	0,3	-	-	-	-
20		2,845	0,3	3,643	0,6	-	4,039	0,75	1,135
20		2,841	0,3	4,084	0,6	-	-	-	-
10	100x200	1,956	0,15	2,259	0,3	-	2,396	0,375	0,659
10		1,949	0,15	2,427	0,3	-	-	-	-
10		-	-	2,880	0,3	-	-	-	-
S7	a x b mm x mm	$\sigma_m = 8 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$			
		w_{S7}	u_{rechn}	w_{S7}	u_{rechn}	w_{S1}	w_{S7}	u_{rechn}	w_{S1}
10	200x200	4,795	0,6	5,530	0,75	1,516	-	-	-
20		6,226	1,2	6,719	1,50	-0,611	-	-	-
10	100x200	3,468	0,6	3,862	0,75	0,797	-	-	-
10		3,811	0,6	-	-	-	5,781	1,50	-0,963

w_{S7} : im Rahmen der Serie 7 gemessene Horizontalverschiebungen

w_{S1} : im Rahmen der Serie 1 gemessene Horizontalverschiebungen

$$u_{\text{rechn}} = \frac{\sigma \cdot \alpha}{2 \cdot G} \cdot t$$

Tabelle 7: Vergleich der Horizontalverschiebungen w

Die Gegenüberstellung der Horizontalverschiebungen w in der Tabelle 7 zeigt, daß bei exzentrischem Aufbringen der Vertikallast eine erhebliche Vergrößerung der Horizontalverschiebung w entsteht, die bei den vorliegenden Versuchen bis zu ca. $w \approx 6$ mm gegenüber den Werten der Serie 1 beträgt. Die Größe dieser Verschiebungszunahme bestätigt die bereits bei der Versuchsdurchführung gemachte Beobachtung, daß Verschiebungen in der hier gemessenen Größenordnung nur in Verbindung mit Gleitbewegungen in der Kontaktfläche entstehen können. Dies erklärt auch die großen Abweichungen zwischen den rechnerisch ermittelten Werten u und den Versuchswerten w . Da mit dem Rechenansatz lediglich die elastischen Lagerverformungen und nicht die Größe der Gleitbewegungen erfaßt werden, deuten die Abweichungen zwischen Rechen- und Versuchswert darauf hin, daß die Gleitbewegungen bei der vorliegenden Reihenfolge der Beanspruchung bis zu 5 mm größer als die elastischen Verformungen sind.

Die Zunahme der Gleitbewegungen gegenüber den Versuchen der Serie 1 ist durch die höhere Lastkonzentration am stärker beanspruchten Rand des Lagers, die auch aus den gemessenen Lagerstauungen deutlich wird, erklärbar. Hierdurch verringert sich der Anteil des Formschlusses zwischen Elastomer und Kontaktfläche am Bewegungswiderstand, der hierdurch insgesamt geringer wird. Insbesondere unter geringen mittleren Pressungen, bei denen auch die Reibung noch nicht sehr groß ist, entstehen daher größere Gleitbewegungen.

10. Vorschläge zur Bemessung und Schlußfolgerungen für die Konstruktionspraxis unbewehrter, lose verlegter Elastomerlager

10.1 Zulässigkeit höherer Lagerpressungen

Zur Frage der Zulässigkeit erhöhter Pressungen für unbewehrte Elastomerlager kann im Hinblick auf die Größe der Lagerstauchungen festgestellt werden, daß bei erhöhter zentrischer Beanspruchung keine überproportionale Zunahme der Stauchungen erfolgt.

Da infolge der annähernden Volumenkonstanz mit erhöhten Pressungen ($\sigma_m > 10 \text{ N/mm}^2$) bei gleichzeitiger Winkelverdrehung auftretende Ausbreitmaß erreicht jedoch insbesondere bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 20 \text{ mm}$ eine Größenordnung, die auf erhebliche Gleitbewegungen in den Kontaktflächen und auf inneren Walkverschleiß beim Aufbringen der Verdrehung der angrenzenden Bauteile hindeutet. Die gemessenen Horizontalverschiebungen w infolge der Horizontalkomponente der Vertikallast erreichten unter Pressungen von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$ Werte bis zu ca. $w = 15 \text{ mm}$. Hierin sind Gleitwege zwischen Lager und Kontaktfläche von bis zu ca. 10 mm enthalten.

Wegen der bei den dicken unbewehrten Elastomerlagern ($t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$) unter Pressungen über $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ aufgetretenen Ausbreitmaße und der unter gleichzeitiger Verdrehung festgestellten Gleitbewegungen in den Kontaktflächen können Verschleißerscheinungen bei diesen Lagern zumindest nach mehreren Bewegungs- und Belastungszyklen nicht ausgeschlossen werden, wenngleich bei der vorliegenden Versuchsreihe nach einmaliger Belastung und Verdrehung noch keine ausgeprägten Verschleißerscheinungen an den Lagern sichtbar waren.

Soll ein unbewehrtes Elastomerlager nicht als kurzlebiges Verschleißbauteil betrachtet werden, sollte daher die Zulässigkeit

erhöhter Pressungen zwischen $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ bei Lagerdicken ab $t = 10 \text{ mm}$ mit einer Beschränkung der zulässigen Winkelverdrehung auf folgenden Wert verbunden sein:

$$\text{zul } \alpha = 0,1 \cdot t/a \text{ [rad]}$$

Bis zu mittleren Spannungen von $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ zeigten sich keine nennenswerten Erhöhungen der Horizontalverschiebung w , so daß bis zu dieser Beanspruchungshöhe auf Einschränkungen der zulässigen Winkelverdrehung verzichtet werden könnte.

Besondere Aufmerksamkeit und Sorgfalt bei der Herstellung der an das Lager grenzenden Bauteiloberflächen ist jedoch bei Pressungen größer $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ immer erforderlich, um ungewollte Verdrehungswinkel zu begrenzen und somit die aus der Schiefstellung der Vertikalkraft resultierende Horizontalkomponente einzuschränken.

Bei dünnen unbewehrten Elastomerlagern ($t = 5 \text{ mm}$) ist die Gefahr erhöhter Verschleißerscheinungen unter hohen mittleren Pressungen bei gleichzeitiger Winkelverdrehung geringer, da bei diesen Lagern ohnehin nur geringe Winkelverdrehungen zulässig sind. Darüber hinaus ist auch das Ausbreitmaß unter hohen Pressungen kleiner, und die Gleitbewegungen infolge der Horizontalkomponente bei Verdrehung werden zumindest teilweise durch Abrollvorgänge überlagert, die zu einer Verminderung äußerer Verschleißspuren führen.

Wie bereits in Abschnitt 9.1 ausgeführt, sind zu einer abschließenden Beurteilung der Zulässigkeit erhöhter Pressungen insbesondere Aussagen über das Langzeit- und das Alterungsverhalten erforderlich, die aufgrund der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Kurzzeitversuche nicht gemacht werden können.

10.2 Lagerstauchungen unter zentrischer und exzentrischer Vertikalbelastung

Die unter zentrischer Beanspruchung in der Lagerachse gemessenen Stauchungen wurden mit den in Abschnitt 9.1.1 aufgeführten Berechnungsvorschlägen (1), (2) und (3) verglichen. Dabei ergab sich wie bereits in /1/ eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit Vorschlag (1), dem damit auch für unbewehrte Elastomerlager aus EPDM und auch für die Stauchungsermittlung unter erhöhten Pressungen bis $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ wegen der einfachen Handhabung der Verzug zu geben ist.

$$f = t \cdot \frac{\sigma_m}{10 \cdot G \cdot S + 2 \cdot \sigma_m}$$

Die durchgeführten Versuche zeigten, daß vor allem die Kontaktflächenbeschaffenheit einen Einfluß auf die Größe der Lagerstauchungen ausübt. Daneben sollte auch das Langzeitverhalten und der Temperatureinfluß berücksichtigt werden. Bereits in /1/ wurde daher folgende Erweiterung des oben genannten Berechnungsvorschlags angegeben, die auch für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Lager gilt:

$$f = t \cdot \frac{\sigma_m}{10 \cdot G \cdot S + 2 \cdot \sigma_m} \cdot \frac{1}{k_c} \cdot k_T \cdot k_z \cdot k_M + \Delta t_0$$

Dabei berücksichtigt

- k_T die Langzeitwirkung: $k_T = 1 + \varphi$,
zum Kriechbeiwert φ s. Abschnitt 2.2 und 9.4
- k_z den Temperatureinfluß, s. Abschnitt 2.2
- k_c die Oberflächenbeschaffenheit. Entsprechende Werte können aus den Versuchsergebnissen der Serie 2 abgeleitet werden.

$k_c = 1,2 - 1,5$ bei mit sägerauhem Holz geschalter Betonfläche
für Lagerdicke $\geq t = 10$ mm

$= 1,0$ bei mit sägerauhem Holz geschalter Betonfläche
für $t = 5$ mm

$= 1,0$ bei mit Kunststoffschalung oder kunststoffbeschichteter Schalung hergestelltem Beton und bei glatt abgezogenem Beton

$= 0,4 - 0,6$ bei glatten Kontaktflächen, z. B. Stahl, Kunststoff o. ä.

- k_M Belastungswechsel bzw. Änderungen der Winkelverdrehung.

Obwohl unbewehrte, lose verlegte Elastomerlager nur bei vorwiegend ruhender Belastung eingesetzt werden sollten, können Lastwechsel und mehrfache Änderungen der Winkelverdrehung im Laufe der Lebensdauer eines Lagers auftreten. Die im Rahmen der Serien 5 und 6 durchgeführten Versuche zeigten, daß Mehrfachbelastungen bzw. -verdrehungen zu Stauchungszunahmen zwischen 10 % und 30 % - bezogen auf den Ausgangswert - führen. Berücksichtigt man, daß Lastwechsel und Verdrehungsänderungen in Bauwerken sehr viel langsamer ablaufen als in den vorliegenden Versuchen und daß eine vollständige Entlastung wohl kaum auftritt, erscheint eine Erhöhung der nach obigem Ansatz erwarteten rechnerischen Lagerstauchung von 10 % ausreichend.

$$k_M = 1,1$$

Der Beiwert Δt_0 soll unvermeidbare Streuungen berücksichtigen. Er wird mit $\Delta t_0 = 0,05 \cdot t < 0,5$ mm angegeben.

Die Elastomerlager sollten generell auf saubere und vor allem auch trockene Oberflächen gleicher Struktur verlegt werden. Das Verlegen der Lager bei Regen oder auf verschmutzte Flächen (z. B. mit Schalöl) vermindert die Querdehnungsbehinderung erheblich und hat damit

beträchtliche Steigerungen der Lagerstauchungen zur Folge. Ungleiche Oberflächenstrukturen im Bereich des Lagers können aufgrund unterschiedlicher Rauigkeit im Extremfall zu Lagerverdrehungen um die senkrechte Achse bei Belastungswechseln oder Änderungen der Winkelverdrehung führen.

10.3 Exzentrizität e der Vertikallast bei Winkelverdrehungen

Die in den Versuchen gemessenen Exzentrizitäten e wurden mit folgendem, bereits in /1/ mitgeteilten, empirisch ermittelten Ansatz verglichen:

$$e = \frac{a^2}{2 \cdot t} \cdot \left(\frac{1}{150} + \alpha \right)$$

In diesem Ansatz kann die Exzentrizität bei $\alpha = 0$ als Folge eines ungewollten Verdrehungswinkels $\alpha_u = 1/150 = 0,0067$ rad gedeutet werden.

Die Berücksichtigung des in /1/ für den ersten Summanden angegebenen Faktors $4\sqrt{5,0/\sigma_m}$ führte bei den hier untersuchten hohen Pressungen zu einer Erhöhung der Abweichung der Versuchsergebnisse von den rechnerischen Werten und sollte daher unberücksichtigt bleiben.

Der Vergleich (siehe hierzu auch Bilder A 1 bis A 15) ergab eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit obigem Ansatz bei mittleren Pressungen von $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ für alle untersuchten Lagerdicken. Bei mittleren Pressungen von $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ zeigte sich jedoch für Lagerdicken $t = 10 \text{ mm}$ und $t = 20 \text{ mm}$, daß die Versuchsergebnisse die errechneten Exzentrizitäten überschritten. Dies ist auf die erhebliche Zunahme der Horizontalverschiebung w bei großen Lagerdicken unter so hohen Pressungen zurückzuführen. Der Ansatz ist demzufolge bei diesen Fällen wie folgt zu ergänzen:

$$e = \frac{a^2}{2 \cdot t} \cdot \left(\frac{1}{150} + \alpha \right) + w$$

Dies gilt auch für die Versuche der Serie 3, bei denen eine zusätzliche Horizontalkraftbeanspruchung aufgebracht wurde, die ebenfalls große Horizontalverschiebungen w zur Folge hatte.

Der Einfluß von Langzeiteinwirkungen, Mehrfachbelastungen und -verdrehungen auf die Exzentrizität ist gering und kann im Rahmen der bauüblichen Toleranzen vernachlässigt werden.

Für die Bemessung der unterstützenden Bauteile und des Lagers wird folgende Pressungsverteilung empfohlen, die mit Bild 44 in /1/ übereinstimmt.

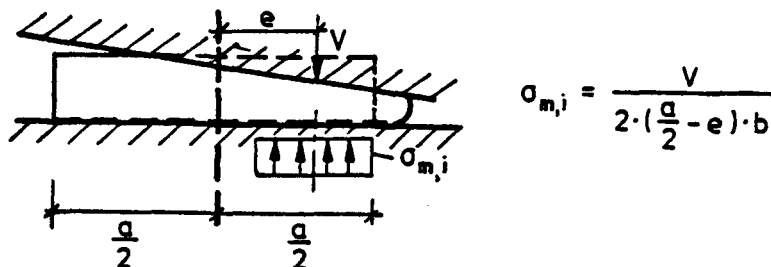


Bild 11: Ansatz der Lagerpressung

10.4 Horizontalverschiebung w und aufnehmbare Horizontalkraft H

Nach den derzeit noch gültigen Vorschriften für unbewehrte Elastomerlager /2/ ergibt sich die zulässige Horizontalkraft entweder nach dem Gleitkriterium oder nach dem Deformationskriterium.

Gleitkriterium: $\max. \text{ zul. } H = 0,2 \cdot \text{zul. } \sigma_m \cdot a \cdot b$

Deformationskriterium: $\text{zul. } H = \text{zul. } \tan \gamma \cdot G \cdot a \cdot b$

Bei den im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Versuchen, die jeweils unter mittleren Pressungen $\sigma_m \geq 5 \text{ N/mm}^2$ gefahren wurden, ergibt sich durch das Deformationskriterium die

geringere und damit maßgebende zulässige Horizontalkraft H (siehe Tabelle A 14). Die Versuchsergebnisse zeigen, daß die durch dieses Kriterium festgelegte Horizontalkraft nicht immer ohne Bewegungen in den Kontaktflächen aufgenommen werden kann. Insbesondere bei den dünnen Lagern, also den Lagern mit größerer Schubspannbarkeit, wurden unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ bereits vor Erreichen der durch das Deformationskriterium gegebenen Horizontalkräfte Gleitbewegungen festgestellt. Unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ und bei den $t = 20 \text{ mm}$ dicken Lagern auch unter $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ stimmt die durch das Deformationskriterium gegebene Horizontalkraft in etwa mit der Horizontalkraft überein, bis zu der eine Schubbeanspruchung durch elastische Verformungen, also ohne Bewegungen in der Kontaktfläche, aufgenommen werden kann.

Zur Beurteilung der Größe einer zulässigen Horizontalkraftbeanspruchung erscheint es durchaus möglich, einen Schlupf, jedoch keine größeren Gleitbewegungen zwischen Lager und Bauteil zuzulassen, da bei einmaligen Bewegungen keine Verschleißerscheinungen festgestellt wurden und da auch aus der Baupraxis keine Fälle bekannt sind, bei denen ein einmaliger Schlupf zu Schaden geführt hat. Aufgrund der Versuchsergebnisse, die bereits unterhalb der zur Zeit zulässigen Horizontalbeanspruchung Gleitbewegungen ausweisen, kann jedoch vermutet werden, daß ein Schlupf bei nach den zur Zeit gültigen Richtlinien /2/ bemessenen Lagern häufiger aufgetreten ist.

Eine Erhöhung der Sicherheit gegen Gleitbewegungen würde die Einführung eines variablen Deformationskriteriums bzw. Gleitkriteriums bedeuten, das für dünne Lager ($t = 5 \text{ mm}$) kleinere aufnehmbare Horizontalkräfte als bisher ergeben sollte. Anhaltswerte für die Abstufung enthält Abschnitt 9.3.1. Genauere Werte müßten aus Reibungskurven abgeleitet werden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgestellt wurden.

Winkelverdrehungen sind bei der Festlegung zulässiger bzw. aufnehmbarer Horizontalbeanspruchungen stets zu berücksichtigen, da sie eine zusätzliche Horizontalkomponente erzeugen. Darüber hin-

aus zeigte sich, daß große Winkelverdrehungen zwar zu einer Erhöhung der Reibung in dem stärker beanspruchten Lagerbereich führen, daß aber die Summe des Bewegungswiderstandes - auf die gesamte Lagerfläche bezogen - geringer wird. Besondere Sorgfalt ist daher für die Herstellung paralleler Auflagerflächen notwendig, um ungewollte Schiefstellungen und Verdrehungen möglichst klein werden zu lassen.

11. Auswertung der Versuche an bewehrten Elastomerlagern und Diskussion der Ergebnisse

11.1 Ergebnisse der Serie 8

Der Versuchsablauf der Serie 8 begann mit dem Aufbringen der vertikalen Beanspruchung in vier jeweils gleichen Stufen. Danach wurde der Verdrehungswinkel $\alpha = 0,03$ rad in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005$ rad aufgebracht und anschließend wieder zurückgefahren. Daraufhin folgte die Entlastung des Lagers.

Dieser Versuchsablauf, der für die Betrachtung der verschiedenen, im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflüsse in den nachfolgenden Serien entsprechend ergänzt bzw. abgeändert wird, stellt somit wie die Serie 1 für die Untersuchungen mit unbewehrten Lagern die Grundform dar, aus welcher Vergleichswerte für die Serien 9 bis 12 abgeleitet werden können, die zur Einordnung der Versuchswerte dieser Serien in das gesamte Versuchsprogramm beitragen.

Die aufgebrachten Vertikalspannungen betrugen in einigen Versuchen bis zu $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ (siehe Tabelle A 9); sie lagen damit um den Faktor 3 außerhalb der derzeit zulässigen Pressung.

11.1.1 Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz}

Die Lagerstauchungen bewehrter Elastomerlager sind geringer als die unbewehrter Elastomerlager mit gleicher Elastomerdicke, da wegen der nahezu vollständigen Volumenkonstanz des Elastomers Zusammendrückungen nur in dem Maße entstehen können, wie das Volumen durch Auswölbung der seitlichen Flächen zwischen den Bewehrungsblechen ausgeglichen werden kann.

Die in der Lagerachse gemessenen Stauchungen f_{zen} verändern sich bei Verdrehungen bis zum Auftreten einer klaffenden Fuge nur geringfügig. Dementsprechend stärker nimmt die in der Achse der

exzentrisch angreifenden Vertikalkraft gemessene Stauchung f_{exz} zu

Die in den Versuchen gemessenen Lagerstauchungen unter zentrischer Normalspannung (siehe Tabelle A 22) wurden mit den Werten verglichen, die sich nach folgendem Ansatz, der bereits in /1/ und /14/ mitgeteilt wurde, ergeben:

$$f = A + T \cdot \frac{G}{E_{i,v}}$$

Darin ist $E_{i,v}$ der aufgrund der Theorie von Topaloff wie folgt ermittelte ideelle Elastizitätsmodul, der es erlaubt, Lagerverformungen nach den aus der klassischen Elastizitätstheorie bekannten Beziehungen zu bestimmen:

$$E_{i,v} = E \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_v}$$

$$E = 3 \cdot G$$

b/a	0,5	1,0	2,0	∞
η_v	17,5	7,1	4,4	3,0

η_v = Summenbeiwert nach Topaloff /43/ für Winkelbelastung

Der Summand A berücksichtigt sogenannte "Anpassungssetzungen", die zum Beispiel nach Bild 4.199 aus /14/ ermittelt werden können und danach zwischen 0,5 und 3 mm liegen.

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Stauchungen wurde wie bereits bei den Serien mit unbewehrten Lagern der Quotient aus diesen Werten gebildet. Die Mittelwerte dieser Quotienten enthält die Tabelle 8, in der darüber hinaus auch die größte Stauchungsdifferenz als absoluter Wert für jedes verwendete Lager angegeben ist.

a : b x d [mm]	T [mm]	E _{i,v} [N/mm ²]	X _{m_f} [*]	Δf _{max} [*] = f _{zen,Versuch} - f _{rechn} [mm]
10 : 150x35	25	235,2	1,062	0,390
15 : 200x14	10	477,9	1,370	0,309
15 : 200x35	25	477,9	1,317	1,294
20 : 150x35	25	477,9	1,377	0,844
15 : 200x56	40	477,9	1,095	0,425
20 : 250x52	37	315,0	1,210	0,423
25 : 300x52	37	315,0	1,195	0,470
200x52	37	234,4	1,031	0,272
250x52	37	366,2	1,168	0,369

* x : Mittelwert aus $\frac{f_{zen,Versuch}}{f_{rechn}}$

Δ_{max}: maximale Stauchungsdifferenz zwischen Versuchswert und rechnerischem Wert

Tabelle 8: Mittelwerte der Quotienten aus den im Versuch gemessenen Lagerstauchungen und den rechnerischen Lagerstauchungen sowie größte absolute Differenz in Abhängigkeit der Lagerabmessungen

Die Tabelle 8 zeigt, daß sich die tatsächlich eintretende Lagerstauchung höher einstellt, als es der Berechnungsvorschlag erwarten läßt. Die Abweichung zwischen den Versuchsergebnissen und den rechnerischen Werten liegt zwischen 3,1 und 37,7 Prozent bei einer mittleren Abweichung von ca. 20 %. Die ebenfalls mitgeteilte maximale Stauchungsdifferenz beweist jedoch, daß trotz der relativ hohen prozentualen Abweichung von einer guten Übereinstimmung zwischen Berechnungsvorschlag und Versuchswerten gesprochen werden kann, da die maximale absolute Differenz in der Regel kleiner als 0,5 mm ist und nur bei Verwendung des Lagers 150 x 200 x 35 mm größer als 1 mm wurde.

Die Höhe der mittleren aufgetragenen Normalspannung hat keinen signifikanten Einfluß auf die Übereinstimmung. Dies gilt auch für Pressungen, die oberhalb der derzeit zulässigen Pressung liegen. Auch ein Einfluß der Lagerfläche und der Elastomerdicke ist nicht erkennbar.

11.1.2 Horizontalverschiebungen w

Die in den Versuchen der Serie 8 gemessenen Horizontalverschiebungen w wurden in der Tabelle A 22 mitgeteilt. Auf die Angabe der nach der vollständigen Entlastung der Lager verbleibenden Horizontalverschiebungen wird verzichtet, da sie in der Regel sehr klein sind und bei den Lagern ab einer Elastomerdicke von $T = 25$ mm maximal 3 % der Elastomerdicke betragen. Lediglich bei den Lagern mit einer Elastomerdicke von $T = 10$ mm wurden Werte gemessen, die etwa bei 10 bis 15 % der Elastomerdicke liegen. Aus den gemessenen Horizontalverschiebungen w können folgende Feststellungen abgeleitet werden:

- Die bereits unter reiner zentrischer Beanspruchung gemessenen Verschiebungen w liegen für $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$ unter 1 % und für $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ sowie $\sigma_m = 15 \text{ N/mm}^2$ zwischen 0,5 % und 5 %
 - bezogen auf die Elastomerdicke. Unter höheren Pressungen ergeben sich größere Horizontalverschiebungen. Für $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$ liegt der Mittelwert bei ca. 9 % und für $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ bei ca. 15 % - bezogen auf die Elastomerdicke. Die starken Streuungen der Richtung und der Größe der Horizontalverschiebung zwischen den einzelnen Versuchen deuten darauf hin, daß trotz großer Sorgfalt bei der Herstellung der Auflagerplatten und bei der Einstellung des Versuchsstandes ungewollte Winkelverdrehungen, die zu einer Horizontalbeanspruchung führen, nicht ganz ausgeschlossen werden konnten.

- Entsprechend den Streuungen bei $\alpha = 0,000$ rad weisen auch die infolge der planmäßigen Winkelverdrehung gemessenen Horizontalverschiebungen Abweichungen auf. Die Größenordnung der gesamten Verschiebung w , die sich ergibt, wenn zu den Werten bei $\alpha = 0,030$ rad die Werte bei $\alpha = 0,000$ rad addiert werden, und die Tatsache, daß nach der Entlastung nur sehr geringe Verschiebungen w gemessen wurden, deuten darauf hin, daß die Verschiebungen ausschließlich durch elastische Schubverformungen der Lager erreicht wurden und daß im Gegensatz zu den Versuchen an unbewehrten Lagern der Serie 1 keine bzw. nur sehr geringe Gleitbewegungen in den Kontaktflächen stattgefunden haben.

11.1.3 Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft

Wie für Vertikalbeanspruchung läßt sich auch für eine Momentenbeanspruchung ein ideeller Elastizitätsmodul definieren, der es erlaubt, die Beziehung

$$M = E \cdot I \cdot w''$$

auf Elastomerlager anzuwenden, und der sich auf der Grundlage der Theorie von Topaloff für rechteckige Lager wie folgt ergibt:

$$E_{i,m} = E \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_M}$$

b/a	0,5	1,0	2,0	∞
η_M	34,2	21,5	17,9	15,0

η_M = Summenbeiwert nach Topaloff /43/ für Momentenbeanspruchung

Damit läßt sich die Verdrehung ermitteln zu:

$$\alpha = M \cdot t / E_{i,M} \cdot \frac{a^3 \cdot b}{12}$$

Und die Exzentrizität e der Last ergibt sich bei Rechtecklagern zu:

$$e = \frac{1}{V} \cdot E_{i,M} \cdot \frac{a^3 \cdot b}{12} \cdot \frac{\alpha}{t}$$

Für runde Lager mit dem Durchmesser D gilt:

$$M = \frac{G \cdot D^6 \cdot \alpha}{150 \cdot t^3} \text{ und } e = \frac{G \cdot D^6 \cdot \alpha}{150 \cdot t^3 \cdot v}$$

Die nach diesen Beziehungen ermittelten Exzentrizitäten sind in die Exzentrizitäts-Verdrehungsdiagramme der Serie 8 eingetragen, die im Anhang A enthalten sind. Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Werten zeigt, daß bis zu Verdrehungen von ca. $\alpha = 0,015$ rad eine relativ gute Übereinstimmung gegeben ist. Bei größeren Drehwinkeln hat insbesondere das Auftreten einer klaffenden Fuge größere Abweichung zur Folge. Das Entstehen einer klaffenden Fuge zwischen Lager und Bauteil führt zu einer deutlichen Abflachung der e - α -Kurven (siehe z. B. A 197), also zu einer wesentlich geringeren Zunahme der Exzentrizität bei weiterer Steigerung des Drehwinkels.

Zusätzlich zu den rechnerischen Verläufen der Exzentrizität ist in den Exzentrizitäts-Verdrehungsdiagrammen der Serie 8 auch jeweils der nach den Zulassungen zulässige Verdrehungswinkel α angegeben, durch dessen Begrenzung ein Klaffen zwischen Bauteil und Lager verhindert werden soll. Nach /14/ ergibt sich aufgrund dieser Forderung der zulässige Verdrehungswinkel α mit den dort verwendeten Bezeichnungen wie folgt:

$$\text{Aus } M = \frac{G \cdot a^5 \cdot b \cdot \alpha}{\eta_4 \cdot t^3}$$

$$\text{und } \sigma_m = \frac{N'}{a \cdot b} \text{ und } \eta_4 = 60 \text{ (für } b/a = \infty)$$

folgt mit der Kernweite $M/N = e_K = a/6$

der zulässige Verdrehungswinkel der Zulassungen als

$$\alpha = \frac{10}{G} \cdot \left(\frac{t}{a}\right)^3 \cdot \sigma_m \quad (\text{S. 203 in /14/})$$

Da diese Festlegung des zulässigen Verdrehungswinkels auf der Topaloff'schen Theorie beruht, die für nicht klaffende, bewehrte Lager gilt und nach der Klaffungen aufgrund der unterschiedlichen Steifigkeit gegen Normalkraft- und gegen Momentenbeanspruchung bereits bei $e_K = a/18$ bis $a/30$ (siehe /1/, Seite 11) auftreten, läßt der Ansatz einer zulässigen Lastexzentrizität von $e = a/6$ (Klaffenweite) erwarten, daß bei den bewehrten Lagern noch im Bereich des zulässigen Verdrehungswinkel eine Klaffung auftritt.

Die e - α -Diagramme für Serie 8 zeigen jedoch, daß trotz der zuvor angesprochenen Differenz hinsichtlich der zulässigen Lastexzentrizität lediglich bei den Versuchen 8.12 und 8.18 (siehe Bild A 202 und A 208) Krümmungen der Kurven $e(\alpha)$ unterhalb des zulässigen Verdrehungswinkels auftreten, die auf ein vorzeitiges Klaffen schließen lassen. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, daß der zulässige Drehwinkel bewehrter Lager zusätzlich zu der Forderung, ein Klaffen zu verhindern, durch ein zweites Kriterium begrenzt wird. Verdrehungen des Auflagers erzeugen Schubverformungen und damit auch Schubspannungen. Die Begrenzung der zulässigen Schubspannung führt somit auch zu einer Begrenzung der Auflagerdrehwinkel und ergibt damit das zweite Kriterium für die Festlegung dieses Winkel, das insbesondere bei dünnen Lagern kleinere zulässige Drehwinkel ergibt als das Kriterium, nach dem das Klaffen zwischen Lager und Bauteil verhindert werden soll. Der Ansatz von $e = a/6$ als zulässiger Lastexzentrizität wirkt sich damit lediglich bei dickeren Lagern, etwa ab $d = 35$ mm, aus.

Zusätzlich zu den aufgrund eigener Versuchsergebnisse zusammengestellten Diagrammen (Bild A 190 bis A 226) wurden auch einige Versuche ausgewertet, die im Rahmen von Zulassungsprüfungen durchgeführt wurden. Da die im Rahmen dieser Arbeit interessierenden Ergebnisse teilweise in Form von Spannungs-Verdrehungs-Diagrammen vorlagen, wurden aus diesen Kurven Exzentrizitäts-Verdrehungs-Diagramme ermittelt, die einen Vergleich mit den Bildern der Serie 8 erlauben sollten. Sie sind im Anhang A als Bilder A 278 bis A 289 enthalten und lassen trotz unterschiedlicher Lagerabmessungen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchen der Serie 8 erkennen.

11.2 Ergebnisse der Serie 9, Einfluß gleichzeitiger Vertikal- und Horizontallastbeanspruchung

Die im Rahmen der Serie 9 durchgeführten Versuche sollten den Einfluß gleichzeitiger Vertikal- und Horizontalkraftbeanspruchung sowie die Größe der ohne Gleitbewegungen in den Kontaktflächen aufnehmbaren planmäßigen Horizontalkraft aufzeigen.

Entsprechend dieser Zielsetzung wurde zunächst eine Vertikallast in vier gleichen Stufen aufgebracht und danach die Horizontalbelastung ebenfalls in vier gleichen Stufen. Anschließend wurde der Auflagerdrehwinkel von $\alpha = 0,000$ rad bis auf $\alpha = 0,030$ rad gesteigert. Bei den Versuchen, die mit mittleren Pressungen von $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_m = 15 \text{ N/mm}^2$ gefahren wurden, wurde nach Rücknahme der Verdrehung bei gleichbleibender Vertikalbelastung in einem 2. Belastungszyklus die H-Kraft gesteigert und dann wiederum die Verdrehung aufgebracht (siehe Tabelle A 10).

Die Größe der im ersten Belastungszyklus aufgebrachten Horizontalkraft entsprach dem durch die Begrenzung der zulässigen Schubverformung auf $\tan \gamma = 0,7$ gegebenen Wert. Im zweiten Belastungszyklus wurde die Horizontalkraft jeweils verdoppelt.

Das Aufbringen der Horizontalkraft dauerte je Laststufe im Mittel ca. 1 bis 2 Minuten. Für das Ablesen der Meßwerte wurden weitere 2 Minuten benötigt, so daß der Zeitbedarf für die Laststufen, in denen die Horizontalkraft aufgebracht wurde, ungefähr 3 bis 4 Minuten betrug.

11.2.1 Horizontalverschiebungen w und aufnehmbare Zwangsbeanspruchung

Für die elastischen Verformungen bewehrter Elastomerlager infolge Horizontalkraftbeanspruchung gelten die gleichen Zusammenhänge, die bereits für unbewehrte Elastomerlager in den Abschnitten 9.1.2 und 9.3.1 mitgeteilt wurden. Für die elastische Lagerverformung u bewehrter Lager ergibt sich also entsprechend Bild 10:

$$u = \gamma \cdot T = \frac{H + V \cdot \alpha/2}{A \cdot G} \cdot T$$

Um eine Aussage treffen zu können, ab wann die Horizontalkraftbeanspruchung bei den durchgeführten Versuchen zu Gleitbewegungen in den Kontaktflächen geführt hat, wurde wie bereits bei der Auswertung der Serie 3 ein Vergleich der Versuchsergebnisse w mit dem nach dem obigen Ansatz ermittelten rechnerischen Verschiebung u vorgenommen. Das Ergebnis dieses Vergleichs enthält die Tabelle 9, in der die Mittelwerte der Quotienten aus dem Versuchswert und dem rechnerischen Wert in Abhängigkeit von den Lagerabmessungen und der mittleren Pressung angegeben sind.

Kunstomerlager		$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 15 \text{ N/mm}^2$	
Abmessungen							
$a \times b \times d$	T	X_m	$X_{m,1.\text{Zykl.}}$	$X_{m,2.\text{Zykl.}}$	$X_{m,1.\text{Zykl.}}$	$X_{m,2.\text{Zykl.}}$	
150x200x35	25	0,874	0,912	1,053	0,778	1,015	
200x150x35	25	0,938	0,955	1,142	0,919	1,078	
200x250x52	37	-	1,013	1,165	0,621	0,854	
$\emptyset 200 \times 52$	37	0,999	0,844	1,063	0,643	0,913	

Tabelle 9: Mittelwerte X_m der Quotienten aus den gemessenen Verschiebungen w und der rechnerisch ermittelten elastischen Verformung u für die Laststufen des 1. und 2. Belastungszyklus, in denen die Horizontalkraft aufgebracht wurde ($\alpha = 0,000 \text{ rad}$)

Die Werte der Tabelle 9 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchswerten und den rechnerisch ermittelten elastischen Verformungen u . Im ersten Belastungszyklus liegen die Mittelwerte überwiegend deutlich unter 1,0, d. h., die im Versuch gemessenen Verschiebungen w sind kleiner als die rechnerisch ermittelte elastische Schubverformung; lediglich im zweiten Belastungszyklus unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ ergeben sich für zwei Lagerabmessungen Abweichungen von 14 % bzw. 16 %. Hieraus kann geschlossen werden,

daß keine Gleitbewegungen und nur geringer Schlupf bis zum rechnerischen Schiefstellungswinkel von $\tan \gamma = 0,7$ auftraten und daß auch bei einem rechnerischen Schiefstellungswinkel von $\tan \gamma = 1,4$ ohne Auflagerverdrehung ($\alpha = 0,000$ rad) noch keine größeren Gleitbewegungen stattfanden. Diese Aussage wird durch die in Anhang A enthaltenen Horizontalkraft-Verschiebungs-Diagramme der Serie 9 bestätigt. Die in diesen Diagrammen dargestellten Kurven und die in Tabelle A 23 mitgeteilten Versuchsergebnisse lassen erkennen, daß Gleitbewegungen, also Verschiebungen zwischen Lager und Bauteil, vor allem beim Aufbringen von Auflagerverdrehungen auftreten. Dies ist weniger auf die Zunahme der Horizontalkraft durch die infolge der Auflagerverdrehung entstehende Horizontalkomponente der vertikalen Belastung zurückzuführen als vielmehr auf die Verringerung des Formschlusses zwischen äußerer Elastomerschicht und Kontaktfläche in dem durch die Verdrehung entlasteten Bereich des Lagers.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß bewehrte Elastomerlager auf den hier eingesetzten Kontaktflächen aus Beton nicht gleiten, solange die derzeit zulässige Schiefstellung von $\tan \gamma = 0,7$ nicht überschritten wird. Ohne Auflagerverdrehung haben auch Horizontalkräfte, die zu Schiefstellungen bis ungefähr $\tan \gamma = 1,4$ führen, keine Gleitbewegungen zur Folge. Entsprechend diesen Feststellungen wurden nach den Versuchen auch nur sehr geringe Verschleißerscheinungen an den Oberflächen der untersuchten Lager festgestellt.

11.2.2 Lagerstauchung f_{zen} und Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft

Die in Tabelle A 23 zusammengestellten Versuchsergebnisse zeigen, daß die Lagerstauchung f_{zen} beim Aufbringen der Horizontalkraft, also mit zunehmender Schubverformung, um bis zu 0,5 mm abnimmt. Diese Stauchungsabnahme ist zunächst nicht erklärbar, da die Schubverformung zu einer Konzentration der Normalspannungen im mittleren Bereich des Lagers führt und daher eine zumindest geringfügige Stauchungszunahme zu erwarten wäre.

Bereits in /14/ wird jedoch darauf hingewiesen, daß die Schubverzerrungen im Verhältnis zu den Abmessungen der Elastomerlager nicht klein sind und daß hierdurch Zugspannungen innerhalb des Lagers entstehen, die unter anderem zu einer Dehnung der Oberfläche führen. Diese Oberflächendehnung führt zu einem Abheben der Lagerränder, das durch die einvulkanisierten Bewehrungsbleche nicht verhindert wird und das auch bei den Versuchen mit unbewehrten Lagern bereits festgestellt wurde und bei diesen Lagern zu den in Abschnitt 9.3.1 beschriebenen Abrollvorgängen bei Horizontalkraftbeanspruchung geführt hat, die ebenfalls eine Verringerung der Lagerstauchung zur Folge hatten.

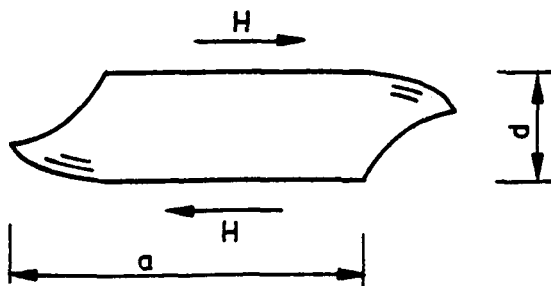


Bild 12: Rollbeginn eines Elastomerlagers

Die unter zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung beobachtete Vergrößerung der Exzentrizität e der resultierenden Lagerkraft betrug im Mittel 69 Prozent - bezogen auf die Größe der Horizontalverschiebung w . Als grober, auf der sicheren Seite liegender Schätzwert für die Exzentrizitätszunahme kann somit wie für unbewehrte Lager (siehe Abschnitt 9.3.2) folgende Beziehung angegeben werden:

$$e_{(H)} \sim w$$

11.3 Versuchsergebnisse der Serie 10, Langzeitverhalten

Die Versuchsdurchführung und die Zielsetzung der Serie 10 entsprechen der Serie 4, in der das Langzeitverhalten unbewehrter Lager untersucht wurde. Aus den gleichen Gründen, die bereits in Abschnitt 9.4 für die Serie 4 erläutert wurden, mußte auch die Standzeit der im Rahmen der Serie 10 gefahrenen Versuche auf ca. drei Stunden beschränkt werden.

Die mittlere Raumtemperatur betrug wiederum bei allen Versuchen ca. 19 ± 2 °C. Größere Temperaturschwankungen traten im Verlauf der einzelnen Versuche nicht auf.

Die Kriechmaße für eine Belastungsdauer von ca. 192 min werden in Tabelle 10 sowohl für die Lagerstauchungen f_{zen} in der Lagerachse wie auch für die Lagerstauchungen f_{exz} in der Achse des Lastangriffs - bezogen auf die fünf Minuten nach Belastungsende gemessene elastische Verformung - angegeben.

$$\varphi_{192 \text{ min}} = \frac{\epsilon_{192 \text{ min}} - \epsilon_0}{\epsilon_0}$$

Versuch Nr.	T mm	a x b x d mm	σ_m N/mm ²	φ_{192} in der Lagerachse	φ_{192} in der Achse des Lastangriffs
10.1	25	150x200x35	5,0	0,059	0,014
10.2			10,0	0,022	0,000
10.3			15,0	0,018	0,007
10.4*			10,0	0,040	0,016
10.5*			15,0	0,030	0,017

* Bei Versuch 10.4 und 10.5 wurde die Belastung und die Verdrehung in je 1 Schritt aufgebracht.

Tabelle 10: Kriechbeiwerte in der Lagerachse und in der Achse des Lastangriffs für die Versuche der Serie 10 nach 192 Minuten Belastungsdauer

die in der Tabelle 10 zusammengestellten Kriechbeiwerte lassen eine Übereinstimmung mit der Tabelle 4 erkennen und bestätigen das folgende auch für unbewehrte Elastomerlager geltende zeitabhängige Verformungsverhalten:

- Die in der Achse des Lastangriffs, also in dem infolge der Winkelverdrehung höher beanspruchten Bereich, aus den Lagerstauchungen f_{exz} errechneten Kriechbeiwerte sind geringer als die aus den Stauchungen in der Lagerachse ermittelten Werte.
- Entsprechend ergeben sich auch mit steigender mittlerer Normalspannung geringere Kriechbeiwerte.

Ein Vergleich der Größenordnung der Kriechbeiwerte aus Tabelle 4 und Tabelle 10, bei dem allerdings der Einfluß unterschiedlicher Elastomerdicken berücksichtigt werden muß, deutet darauf hin, daß die Kriechbeiwerte bewehrter Elastomerlager insbesondere in der Achse der exzentrisch angreifenden Normalkraft deutlich geringer sind. Dies war zu erwarten, da die schubfeste Verbindung des Elastomers mit den Bewehrungsblechen bei den bewehrten Lagern Gleitbewegungen und Spannungsumlagerungen zu weniger belasteten Lagerflächen verhindert, die bei den unbewehrten Lagern eine Zunahme der Verformung bewirken.

Die Kriechbeiwerte aus den Versuchen 10.4 und 10.5, bei denen sowohl die Belastung wie auch die Verdrehung in je einem Schritt aufgebracht wurden, sind ungefähr doppelt so groß wie die der Versuche 10.2 und 10.3, bei denen die Belastung und die Verdrehung schrittweise aufgebracht wurden. Die absolute Größe der Lagerstauchung ist jedoch bei den Versuchen mit höherer Belastungsgeschwindigkeit (10.4 und 10.5) etwas geringer. Der erhöhte Kriechbeiwert führt also nicht zu einer Stauchungszunahme. Er beweist vielmehr, daß bei schrittweiser Belastung ein Teil der Kriechverformungen bereits während des Aufbringens der Belastung auftritt und daß bei langsamen Belastungsvorgängen ein Teil des relativ starken Anfangskriechens mit in die Kurzzeitverformungen ϵ_0 einbezogen wird (siehe /1/, Abschnitt 2.3.3).

Die Kriechverformungen hatten bei allen Versuchen eine Abnahme der Exzentrizität e zur Folge, die zwischen 3 % und 9 % lag - bezogen auf den Wert, der nach dem Aufbringen der Belastung und der Verdrehung gemessen wurde.

Da bei den bewehrten Lagern Gleitbewegungen infolge der geringen Horizontalbeanspruchung aus der Schiefstellung der Vertikallast nahezu vollständig ausgeschlossen werden können (siehe Abschnitt 11.2.1), werden für die Versuche der Serie 10 aus den Horizontalverschiebungen w auch Kriechbeiwerte für Schubbeanspruchung errechnet und in Tabelle 11 mitgeteilt. Sie liegen etwa in der gleichen Größenordnung wie die Kriechbeiwerte für die Druckbeanspruchung in der Lagerachse.

$$\varphi_{S \ 192} = \frac{w_{192 \text{ min}} - w_{5 \text{ min}}}{w_{5 \text{ min}}}$$

Versuch Nr.	Horizontalverschiebung w nach		$\varphi_{S \ 192}$
	5 Minuten	192 Minuten	
10.1	4,803	4,934	0,027
10.2	4,493	4,572	0,018
10.3	7,680	7,985	0,040
10.4	4,988	5,162	0,035
10.5	8,345	8,670	0,039

Tabelle 11: Kriechbeiwerte φ_S für Schubverformungen infolge Auflagerverdrehung nach einer Beanspruchungsdauer von 192 Minuten

11.4 Versuchsergebnisse der Serie 11, Mehrfachverdrehung

Für die Versuche der Serie 6 wurde die Vertikallast stufenweise aufgebracht. Danach wurde das aufliegende Bauteil unter konstanter mittlerer Normalspannung zwischen den Werten $\alpha = + 0,03 \text{ rad}$ und $\alpha = - 0,03 \text{ rad}$ dreimal schrittweise verdreht.

Den beim Aufbringen der Belastung in den Laststufen ohne Winkelverdrehung gemessenen Lagerstauchungen wurden mit dem in Abschnitt 11.1 angegebenen rechnerischen Ansatz zur Ermittlung der Lagerstauchung verglichen. Die in Abschnitt 11.1.1 aufgrund der Versuchsergebnisse der Serie 8 getroffenen Feststellungen wurden hierbei bestätigt.

Darüber hinaus interessierte bei den Versuchen der Serie 11 in besonderem Maße die Zunahme der Lagerstauchung infolge Mehrfachverdrehung. Eine Aussage hierzu ermöglichen die in Tabelle 12 zusammengestellten Mittelwerte der Quotienten aus den Lagerstauchungen des 3. Verdrehungszyklus und des 1. Verdrehungszyklus.

Die Mittelwerte der Tabelle 12 weisen eine Zunahme der Lagerstauchungen zwischen dem ersten und dem dritten Verdrehungszyklus von 4 bis 14 Prozent aus. Sie liegen damit deutlich unter den für unbewehrte Lager ermittelten Werten (siehe Tabelle 6), was zu erwarten war, da dem Einfluß der infolge Mehrfachverdrehung abnehmenden Querdehnungsbehinderung in den Kontaktflächen bei den bewehrten Lagern nur sehr geringe Bedeutung zukommt. Die im Anhang A enthaltenen Stauchungs-Verdrehungsdiagramme für die Serie 11 und die in der Tabelle A 25 enthaltenen Stauchungswerte zeigen, daß sich ein erheblicher Anteil (ca. 50 Prozent) der Stauchungszunahme bereits im ersten Verdrehungszyklus beim Zurückfahren der Verdrehung von $\alpha = + 0,030 \text{ rad}$ auf $\alpha = 0,000 \text{ rad}$ einstellt. Die Zunahme zwischen dem zweiten und dem dritten Verdrehungszyklus ist entsprechend gering. Hieraus kann geschlossen werden, daß die Stauchungszunahme bei Mehrfachverdrehung im wesentlichen auf die Vergrößerung des Ausbreitmaßes und die damit verbundene Dickenänderung der äußeren Elastomerschichten zurückzuführen ist.

Versuch Nr.	a x b x d mm	T mm	σ_m N/mm ²	X_{m_z}	S	X_{m_e}	S
11.1	150x200x35	25	5,0	1,14	0,05	1,12	0,06
11.2			10,0	1,08	0,03	1,08	0,03
11.3			15,0	1,06	0,02	1,06	0,02
11.4	200x150x35	25	5,0	1,09	0,02	1,06	0,03
11.5			10,0	1,04	0,03	1,04	0,03
11.6			15,0	1,06	0,03	1,06	0,03
11.7	200x250x52	37	10,0	1,07	0,03	1,07	0,03
11.8	Ø 200x52	37	10,0	1,08	0,03	1,07	0,03
11.9			15,0	1,06	0,03	1,06	0,02

S: Standardabweichung

X_{m_z} : Mittelwert aus $\frac{f_{zen} \text{ 3. Verdrehungszyklus}}{f_{zen} \text{ 1. Verdrehungszyklus}}$

X_{m_e} : Mittelwert aus $\frac{f_{exz} \text{ 3. Verdrehungszyklus}}{f_{exz} \text{ 1. Verdrehungszyklus}}$

Tabelle 12: Mittelwerte der Quotienten aus den Lagerstauchungen des 3. Verdrehungszyklus und des 1. Verdrehungszyklus

Die ebenfalls im Anhang A enthaltenen Exzentrizitäts-Verdrehungsdiagramme der Serie 11 zeigen, daß die Mehrfachverdrehung einen vernachlässigbar geringen Einfluß auf die Größe der Exzentrizität hat und daß die Kurven der drei Verdrehungszyklen nahezu identisch verlaufen.

Die in Tabelle A 25 angegebenen Horizontalverschiebungen w weisen keine einheitliche Tendenz für die Änderung zwischen dem ersten und dem dritten Verdrehungszyklus auf. Die gemessenen Verschiebungen weisen jedoch darauf hin, daß zumindest in einigen Versuchen geringe Gleitbewegungen oder Schlupf stattgefunden haben

11.5 Versuchsergebnisse der Serie 12, Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchung

Die Versuche der Serie 12 entsprechen den im Rahmen der Serie 7 an unbewehrten Lagern durchgeführten Versuchen (siehe Abschnitt 9.1) und sollten wiederum den Einfluß der Beanspruchungsfolge insbesondere auf die Größe der Horizontalverschiebung w untersuchen. Dafür werden in Tabelle 13 die in den Versuchen der Serie 12 gemessenen Horizontalverschiebungen w den Horizontalverschiebungen w der Serie 8 und den rechnerisch ermittelten Werten gegenübergestellt.

Abmessungen		vertikale Belastung							
$a \times b \times d$ mm	T mm	w_{s12}	u_{rechn}	w_{s12}	u_{rechn}	w_{s8}	w_{s12}	u_{rechn}	w_{s8}
		$\sigma_m = 2 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 4 \text{ N/mm}^2$			$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$		
150x200x35	25	1,573	0,375	1,930	0,75	-	2,136	0,938	2,374
		1,659	0,375	2,263	0,75	-	-	-	-
Ø 200x52	37	2,110	0,555	-	-	-	3,385	1,388	1,743
		1,860	0,555	-	-	-	-	-	-
		$\sigma_m = 8 \text{ N/mm}^2$		$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$			$\sigma_m = 15 \text{ N/mm}^2$		
150x200x35	25	3,738	1,5	4,435	1,875	2,971	-	-	-
		-	-	-	-	-	7,041	2,813	3,779
Ø 200x52	37	3,894	2,220	4,541	2,775	2,416	-	-	-
		-	-	-	-	-	8,789	4,163	7,352

w_{s12} : im Rahmen der Serie 12 gemessene Horizontalverschiebungen

w_{s8} : im Rahmen der Serie 8 gemessene Horizontalverschiebungen

$$u_{\text{rechn}} = \frac{\sigma \cdot a}{2 \cdot G} \cdot T$$

Tabelle 13: Vergleich der Horizontalverschiebungen w

Ein Vergleich der in Tabelle 13 mitgeteilten Horizontalverschiebungen zeigt, daß auch bei den bewehrten Lagern durch exzentrisches Aufbringen der Vertikallast eine Zunahme der Schubverformungen (Kirschkerneffekt) gegenüber den Schubverformungen auftritt, die entstehen, wenn zuerst eine zentrische Vertikalbelastung und dann die Winkelverdrehung aufgebracht wird (Serie 8). Die Größe der Verschiebungszunahme ergibt sich aus Tabelle 13 mit ca. $w = 2 - 3$ mm. Sie ist damit deutlich geringer als bei den unbewehrten Lagern, bei deren Untersuchung Verschiebungszunahmen bis zu ca. $w = 6$ mm gemessen wurden (siehe Tabelle 7).

Dies ist einerseits auf die größere Elastomerdicke bei den untersuchten bewehrten Lagern gegenüber den unbewehrten Lagern zurückzuführen, die eine Verringerung der Schubsteifigkeit bewirkt und damit größere elastische Verformungen ermöglicht, bevor Gleitbewegungen, die bei den unbewehrten Lagern für die große Verschiebungszunahme verantwortlich sind, entstehen können. Andererseits werden bei den bewehrten Lagern durch die Verbindung des Elastomers mit den Bewehrungsblechen Spannungsumlagerungen und Bewegungen des Elastomers zu weniger belasteten Bereichen der Lagerfläche verhindert. Solche Spannungsumlagerungen führen jedoch zu einer teilweisen Aufhebung des Formschlusses zwischen Elastomer und Kontaktfläche sowie - auf die gesamte Lagerfläche bezogen - zu einer Verringerung der infolge Reibung aufnehmbaren Horizontalkraft trotz örtlicher Erhöhung der Reibungszahl (siehe Abschnitt 9.3.1 und 11.2).

Daß auch bei den Versuchen der Serie 12 Gleitbewegungen stattgefunden haben, wird durch die große Abweichung zwischen den Versuchswerten und den rechnerischen Werten, die nur die elastischen Verformungen und nicht die Gleitbewegungen erfassen, deutlich und wurde darüber hinaus bereits bei der Versuchsdurchführung durch Augenschein festgestellt.

Der in den Bildern A 276 und A 277 dargestellte Verlauf der Exzentrizität e zeigt mit steigender Vertikalbelastung die erwartete Exzentrizitätsabnahme. Bei mittleren Pressungen, die etwa zwischen $5,0 \text{ N/mm}^2$ und $6,5 \text{ N/mm}^2$ liegen, nähert sich bei allen Versuchen der Serie 12 die Exzentrizität asymptotisch einer unteren Grenze und bleibt dann auch bei weiterer Laststeigerung annähernd konstant. Dieser Grenzwert wird etwa dann erreicht, wenn die gesamte Lagerfläche überdrückt ist, das heißt, wenn die anfangs vorhandene klaffende Fuge zwischen Lager und Bauteil geschlossen ist. Er stimmt in etwa mit den im Rahmen der Serie 8 bei einer Winkelverdrehung von $\alpha = 0,015 \text{ rad}$ gemessenen Exzentrizitäten e überein. Die Reihenfolge, in der die Beanspruchung eingebracht wird, hat also keinen Einfluß auf die Größe der Exzentrizität bei mittleren Pressungen über ca. $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$. Dies gilt auch für die Lagerstauchungen f_{zen} und f_{exz} .

12. Vorschläge zur Bemessung und Schlußfolgerungen für die Konstruktionspraxis bewehrter, lose verlegter Elastomerlager

12.1 Lagerstauchungen unter zentrischer und exzentrischer Vertikalbelastung

Die unter zentrischer Beanspruchung in der Lagerachse gemessenen Stauchungen wurden mit dem in Abschnitt 11.1.1 angegebenen Berechnungsvorschlag, der von Topaloff /43/ unter Verwendung eines ideellen Elastizitätsmoduls theoretisch abgeleitet wurde, verglichen. Obwohl dieser theoretischen Ableitung einige idealisierende Annahmen zugrunde liegen, die mit dem wirklichen Tragverhalten der Lager nicht übereinstimmen (siehe Abschnitt 4.4.3.1 in /14/), zeigt der Vergleich der in den Versuchen gemessenen Lagerstauchungen mit dem Berechnungsvorschlag eine gute Übereinstimmung, so daß er für die Stauchungsermittlung bewehrter Elastomerlager unter zentrischer Beanspruchung zu empfehlen ist. Darüber hinaus liefert der Ansatz auch für die Ermittlung der Stauchung in der Lagerachse bei exzentrischer Belastung bis zum Auftreten einer Klaffung zwischen Lager und Bauteil gute Ergebnisse.

Die durchgeführten Versuche bestätigen erwartungsgemäß, daß der Einfluß der Kontaktflächenrauigkeit nur einen geringen Einfluß auf das Verformungsverhalten bewehrter Elastomerlager hat. Demzufolge haben auch Mehrfachverdrehungen, die bei den unbewehrten Lagern zu einer Abnahme der Querdehnungsbehinderung und damit zu einer Vergrößerung der Lagerzusammendrückung führten, keinen nennenswerten Einfluß auf die Größe der Lagerstauchung.

Die zeitabhängigen Verformungen sind bei bewehrten Lagern unter exzentrischer Belastung insbesondere im höher beanspruchten Bereich des Lagers, also in der Achse des Lastangriffs, geringer als bei den unbewehrten Lagern, da Spannungsumlagerungen durch die schubfeste Verbindung des Elastomers mit den Bewehrungsblechen weitgehend verhindert werden. Anhaltswerte für die Zunahme der Verformung enthält Tabelle 10, in der die aus den Versuchen der Serie 10 für eine Belastungsdauer von 192 Minuten ermittelten Kriechbeiwerte zusammengestellt sind.

12.2 Exzentrizität e der Vertikallast bei Winkelverdrehungen

Die in den Versuchen gemessenen Exzentrizitäten e wurden mit folgenden in Abschnitt 11.1.3 näher erläuterten Ansätzen verglichen:

$$\text{rechteckige Lager: } e = \frac{1}{V} \cdot E_{i,M} \cdot \frac{a^3 \cdot b}{12} \cdot \frac{\alpha}{t}$$

$$\text{runde Lager: } e = \frac{G \cdot D^6 \cdot \alpha}{150 \cdot t^3 \cdot V}$$

Die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den rechnerischen Ansätzen kann bis zu Winkelverdrehungen von $\alpha = 0,015$ rad als relativ gut bezeichnet werden. Bei größeren Winkelverdrehungen führt vor allem das Auftreten einer klaffenden Fuge zu Abweichungen. Die Exzentrizität wird dabei mit den Rechenansätzen überwiegend zu groß eingeschätzt, da mit zunehmendem Auflagerdrehwinkel die Zunahme der Exzentrizität geringer wird.

Die Vergrößerung der Exzentrizität infolge eines ungewollten Verdrehungswinkels, der z. B. durch Maßabweichungen oder durch nicht parallele Auflagerflächen entsteht, sollte wie bei den unbewehrten Lagern (siehe Abschnitt 10.3) durch Vergrößerung des planmäßigen Winkels α um den Anteil $\alpha_u = 1/150 \cdot n = 0,0067 \cdot 1/n$ rad erfolgen. Dabei gibt n die Anzahl der Elastomerschichten des bewehrten Lagers an.

Der Einfluß von Mehrfachverdrehungen und Kriechverformungen auf die Größe der Exzentrizität ist gering und kann vernachlässigt werden.

Für die Bemessung der unterstützenden Bauteile und des Lagers kann näherungsweise wiederum die in Bild 11 dargestellte Pressungsverteilung empfohlen werden.

12.3 Horizontalverschiebung w und aufnehmbare Horizontalkraft H

Bei den Versuchen mit bewehrten Elastomerlagern wurden höhere Bewegungswiderstände gegenüber Horizontalbeanspruchung als bei unbewehrten Lagern festgestellt. Bis zu einem rechnerischen Schiefstellungswinkel von $\tan \gamma = 1,4$ wurden Horizontalbeanspruchungen fast ausschließlich durch elastische Verformungen aufgenommen. Gleitbewegungen ergeben sich auch bei dieser Schiefstellung erst nach dem Aufbringen von Auflagerverdrehungen.

Hieraus kann geschlossen werden, daß der Bewegungswiderstand bewehrter Elastomerlager vor der ersten Gleitbewegung vor allem durch den Formschluß zwischen Elastomer und Kontaktfläche bestimmt wird. Bei der Festlegung zulässiger Horizontalkräfte bewehrter Elastomerlager ist daher zu berücksichtigen, daß die Abreißwiderstände bis zur Überwindung des Formschlusses erheblich größer sind als die Reibungszahlen bei nachfolgenden Bewegungen.

Eine zulässige Horizontalkraft mit zugehörigen Schubverformungen von $\tan \gamma = 0,7$ bis $\tan \gamma = 1,0$ kann bei den bewehrten, lose verlegten Elastomerlagern aufgrund der durchgeführten Versuche und der oben aufgeführten Überlegungen daher durchaus empfohlen werden.

Weiterhin sind Schwankungen der Oberflächeneigenschaften zu berücksichtigen. Versuche hierzu wurden im Rahmen dieser Arbeit an bewehrten Lagern nicht durchgeführt. Aus den Versuchen der Serie 2 an unbewehrten Lagern kann jedoch geschlossen werden, daß sich bei bauüblichen Betonoberflächen keine großen Unterschiede hinsichtlich des Bewegungswiderstandes zu den hier verwendeten, durch Handabzug hergestellten Oberflächen ergeben.

Wie bei den unbewehrten Elastomerlagern zeigte sich auch bei den Versuchen mit bewehrten Elastomerlagern, daß ein Schlupf zwischen Elastomer und Kontaktfläche häufig bereits vor dem Auftreten von Gleitbewegungen eintritt. Als Schlupf wird hierbei eine kurzzeitige Bewegung, die nicht zu ungehinderten Gleitbewegungen führt

und die bereits vor dem Erreichen des maximalen Bewegungswiderstandes auftritt, verstanden. Wie die vorliegenden Versuche gezeigt haben, sind infolge von Schlupf jedoch keine nennenswerten Verschleißerscheinungen zu befürchten. Da vermutet werden kann, daß Verschiebungen aus Schlupf bei gegenläufiger Beanspruchung in gleicher Weise - also durch Schlupf in die andere Richtung - wieder aufgehoben werden, sollte die Festlegung einer zulässigen Horizontalkraft nicht die Forderung nach Schlupffreiheit beinhalten.

13. Zusammenfassung

Die vorliegende Forschungsarbeit ist eine Fortsetzung des unter /1/ aufgeführten Forschungsvorhabens und behandelt sowohl das Trag- und Verformungsverhalten unbewehrter wie auch bewehrter, lose verlegter Elastomerlager. Sie soll damit vor allem zu einer Verbesserung der Konstruktionspraxis von Auflagerungen im Stahlbetonfertigteilbau beitragen. Ausgehend von dieser Zielsetzung wurden Versuche durchgeführt, die im Hinblick auf die untersuchten Lagertypen in folgende zwei Gruppen aufgeteilt werden können:

- Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten unbewehrter Elastomerlager
- Versuche zum Trag- und Verformungsverhalten bewehrter Elastomerlager

Das Versuchsprogramm, bei dem unbewehrte Lager eingesetzt wurden, ergänzt die zu /1/ durchgeführten Versuche. Aufgrund der Untersuchung der unten aufgeführten Einflüsse werden in Abschnitt 10 Vorschläge zur Bemessung unbewehrter Lager gemacht, die die bereits in /1/ enthaltenen Vorschläge bestätigen und ergänzen:

- Einfluß hoher Pressungen
- Einfluß der Rauigkeit der angrenzenden Bauteiloberflächen
- Einfluß zusätzlicher Horizontalbeanspruchung
- Langzeitverhalten
- Einfluß von Mehrfachverdrehungen und -belastungen
- Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchungen

Wie aus den Versuchen mit unbewehrten Lagern werden auch aufgrund der Versuche mit bewehrten Lagern Vorschläge für die Stauchungsermittlung, für die Bestimmung der Exzentrizität der resultierenden Lagerkraft und für die Festlegung der ohne Gleitbewegungen aufnehmbaren Horizontalkraft angegeben. Folgende Einflüsse, die

im Rahmen des durchgeführten Versuchsprogramms betrachtet wurden, werden dabei berücksichtigt:

- Einfluß zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung
- Langzeitverhalten
- Einfluß von Mehrfachverdrehungen
- Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchungen

Die Auswertung des umfangreichen, zu /1/ und zu dieser Arbeit untersuchten Versuchsprogramms erlaubt die Feststellung, daß die Auflagerung mittels elastomerer Werkstoffe insbesondere im Stahlbetonfertigteilbau gegenüber der mittlerweile kaum noch üblichen Anordnung einer Mörtelfuge die optimale Lösung darstellt. Die wesentlichen Vorteile sind dabei in der Abminderung von Spannungsspitzen und der Verringerung der Exzentrizität der resultierenden Lagerkraft gegenüber herkömmlichen Auflagerungen zu sehen. Darüber hinaus kann wegen der einfachen Einbaumöglichkeiten und der sofort vorhandenen vollen Belastbarkeit erheblicher Zeitaufwand bei der Montage von Fertigteilbauten eingespart und damit die Bauzeit insgesamt verkürzt werden. Die besonderen Werkstoffeigenschaften elastomerer Materialien, die durch ein zu den üblichen Baustoffen unterschiedliches Trag- und Verformungsverhalten gekennzeichnet sind, müssen bei der Planung und Konstruktion von Auflagerungen unter Beachtung der konstruktiven Gegebenheiten des jeweiligen Bauwerks jedoch stets berücksichtigt werden, um eine zuverlässige, dauerhafte und damit auch wirtschaftliche Lösung zu erreichen.

L i t e r a t u r v e r z e i c h n i s

- /1/ Iványi, G.; Kordina, K.; Nölting, D.: Tragverhalten von Auflagern im Stahlbetonfertigteilbau bei Verdrehung und Verschiebung der aufliegenden Fertigteile. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godesberg (Az.: BII5-800174-46), durchgeführt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979.

- /2/ Richtlinien für die Herstellung und Verwendung von unbewehrten Elastomer-Lagern, Mitteilungen des Instituts für Bautechnik, 3, 6, 1972, S. 7 - 9 (Erläuterungen hierzu s. /15/).

- /3/ Italienische Norm CNR-UNI 10018-68 für Gummilager (1968).

- /4/ ORE Office de Recherches et d'Essais: Verwendung von Gummi für Brückenlager, Frage D 60, Utrecht (1962, 1964, 1965).

- /5/ Ministry of Transport: Provisional Rules for the Use of Rubber Bearings in Highway Bridges, Memo. 802, London (1962).

- /6/ Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc: Caractéristiques en Compression des Vulcanisats. Bulletin No. 80, Paris (1969).

- /7/ Andrä, W.; Leonhardt, F.: Neue Entwicklungen für Lager von Bauwerken, Gummi- und Gummitopflager. Die Bautechnik, 39, 2, (1962), S. 37 - 50.

- /8/ Battermann, W.: Baulager aus synthetischen Elastomeren. Kunststoffe im Bau, 2, 7, 1967, S. 59 - 73.

- /9/ Battermann, W.; Köhler, R.: Elastomere Federung, Elastische Lagerungen, Grundlagen ingenieurmäßiger Berechnung und Konstruktion, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin 1982.

- /10/ Battermann, W.; Steinmeier, R.: Elastomere für die Lagerungs- und Abdichtungstechnik im Bauwesen, Kunststoffe im Bau, 9, 3 und 4, 1974, S. 62 - 68.
- /11/ Bock, H.M.; Lehmann, D.: Beiträge zur Berechnung von Elastomere-Lagern. Die Bautechnik, 55, 1, 1978, S. 19 - 22, 3, 1978, S. 99 - 102 und 6, 1978, S. 190 - 198.
- /12/ Bock, H.M.: Ein Beitrag zur Berechnung des ebenen Verformungszustandes von Elastomerlagern mit Hilfe der Methode der finiten Elemente. Dissertation, TU Berlin, 1976.
- /13/ Eggert, H.: Lager für Brücken und Hochbauten. Der Bauingenieur 53, 5, 1978, S. 161 - 168.
- /14/ Eggert, H.; Grote, J.; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen, Bd. I (Entwurf - Berechnung - Planung), Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1974.
- /15/ Einsfeld, U.: Erläuterungen zu den "Richtlinien für die Herstellung und Verwendung von unbewehrten Elastomer-Lagern", Mitteilungen des Instituts für Bautechnik, 3, 6, 1972, S. 2 - 4.
- /16/ Ertingshausen, H.; Klinkert, H.: Entwicklung einer Meßeinrichtung zur Ermittlung der Verteilung von Flächenpressungen und Querdehnungen in den Auflagerflächen unter Stahlbetonfertigteilen. Bericht über ein Forschungsvorhaben am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979.
- /17/ Flohrer, M.: Untersuchungen über die Eignung unbewehrter Elastomerlager als Baulager. Betonstein-Zeitung 37, 11, 1971, S. 707 - 718.
- /18/ Flohrer, M.; Stephan, E.: Bemessungsdiagramme für die Querkzugkräfte bei Elastomerlagern. Die Bautechnik 52, 9, 1975, S. 296 - 301, und 12, 1975, S. 420 - 427.
- /19/ Franz, G.: Gummilager für Brücken, VDI-Zeitschrift 101, 12, 1959, S. 471 - 478.

- /20/ Grote, J.: Neoprenelager - einige grundsätzliche Erwägungen. Kunststoffe im Bau 2, 7, 1967, S. 104 - 106.
- /21/ Grote, J.: Unbewehrte Elastomere-Lager. Der Bauingenieur 44, 4, 1969, S. 121 - 126.
- /22/ Keys, W.C.: Rubber springs, Mech.Engng., 5, 1937.
- /23/ Kilcher, F.; Zumbühl, R.: Die Auflagerung von Decken im Hochbau. Schweizerische Bauzeitung 89, 29, 1971, S. 737 - 742.
- /24/ Kordina, K.; Nölting, D.: Zur Auflagerung von Stahlbetonteilen mittels unbewehrter Elastomerlager. Der Bauingenieur, 1981.
- /25/ Kupfer, H.; Müller, F.: Vorschläge zur Vermeidung von Schäden an Fertigteilauflagern unter besonderer Berücksichtigung von Typisierung und Maßabweichungen. 5. Deutsche Fertigbautagung, Hannover, 1974.
- /26/ Lehmann, D.: Beiträge zur Berechnung der Elastomerlager IV. Betrachtungen zur exakten Lösung des reibungsfrei gelagerten, unbewehrten, rechteckigen Elastomer-Linienlagers unter ruhender Belastung. Die Bautechnik, 5/1979, S. 163 - 169.
- /27/ Lenk, R.S.: Rheologie der Kunststoffe. Carl-Hanser-Verlag, München, 1971.
- /28/ Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau, 2. und 3. Teil, Springer-Verlag, Berlin, 1974.
- /29/ Mann, W.: Über die Ausbildung von Balkenauflagern und Auflagerkonsolen aus Stahlbeton. Beton- und Stahlbeton 70, 1, 1975, S. 1 - 4.
- /30/ Müller, F.: Zum gummielastischen Verhalten elastomerer Lagerwerkstoffe unter langzeitiger thermischer und mechanischer Beanspruchung. Dissertation, RWTH Aachen, 1979.

- /31/ Müller, F.: Langzeitverformungsverhalten elastomerer Werkstoffe für Baulager unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen; Nr. 2799, Westdeutscher Verlag, Opladen, 1979.
- /32/ Müller, F.H.: Plastisch-elastisches Verhalten der Hochpolymere und kinetische Theorie. Schweizer Archiv, 19 (1953), S. 78 - 85.
- /33/ Müller, F.; Sasse, H.R.; Thormählen, U.: Stützenstöße im Stahlbeton-Fertigteilbau mit unbewehrten Elastomerlagern, Heft 339, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1982.
- /34/ Pare, R.L.; Keiner, E.P.: Elastomeric Bridge Bearings, Highway Research Board, Bulletin 242, 1960, S. 1 - 19.
- /35/ Paschen, H.: Das Bauen mit Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonfertigteilen, Betonkalender 1982, Bd. II, S. 533 - 696, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1975.
- /36/ Rahlwes, K.: Lagerung und Lager von Bauwerken. Betonkalender 1977, Bd. II, S. 981 - 1085, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1977.
- /37/ Sasse, H.R.; Schorn, H.: Hochbelastbare Elastomerlager im Betonfertigteiltbau - Eigenschaften und Anwendung. Der Plastikverarbeiter, 5, 1970.
- /38/ Sasse, H.R.; Schorn, H.: Elastomere als Baulager - Stand der Entwicklung, Plasticconstruction 1, 5, 1971, S. 214 - 227.
- /39/ Schorn, H.: Beitrag zum Verformungsverhalten elastomerer Lagerwerkstoffe. Dissertation, RWTH Aachen, 1972.
- /40/ Schrage, I.: Über den Bewegungswiderstand von unverankerten Elastomer-Lagern. Dissertation, RWTH Aachen, 1979.
- /41/ Suess, K.; Grote, J.: Einige Versuche an Neoprenelagern. Der Bauingenieur 38, 4, 1963, S. 152 - 157.

/42/ Topaloff, B.: Gummilager für Brücken. Beton- und Stahlbetonbau 54, 9, 1959, S. 229 - 230.

/43/ Topaloff, B.: Gummilager für Brücken - Berechnung und Anwendung. Der Bauingenieur 39, 2, 1964, S. 50 - 64.

A N H A N G . . . A

TABELLEN A 1 BIS A 26

Versuchs- serie	Programm siehe Tabelle	Vorrangige Ziele bzw. Fragestellungen	Anzahl der Versuche	Ergebnisse		
				Textteil Abschnitt	Anhang Tabelle	Anhang Bild A
Versuchsserien mit unbewehrten Elastomerlagern aus EPDM						
Tastver- suche		<ul style="list-style-type: none">- Kontrolle und Ver- besserung der Be- lastungseinrichtung- Abschätzung der in den folgenden Serien zu erwartenden Ver- formungen und Bruch- lasten	14			
1	A 2	<ul style="list-style-type: none">- f und e infolge V und α	39	9.1	A 15	1- 60
2	A 3	<ul style="list-style-type: none">- Einfluß der Ober- flächenbeschaffen- heit und der Rauhgig- keit der an das La- ger angrenzenden Be- tonbauteile	42	9.2	A 16	61-109
3	A 4	<ul style="list-style-type: none">- W und e infolge Horizontal- und Verti- kallast und Verdreh- ung- aufnehmbar H	10	9.3	A 17	110-134
4	A 5	<ul style="list-style-type: none">- Langzeitverhalten	8	9.4	A 18	135-138
5	A 6	<ul style="list-style-type: none">- Einfluß von Mehrfach- belastung und Verdreh- ung auf f und e	9	9.5	A 19	139-165
6	A 7	<ul style="list-style-type: none">- Einfluß d. Mehrfach- verdrehung zwischen $\pm 0,03$ rad auf f und e bei konstanter Vertikallast	12	9.6	A 20	166-189
7	A 8	<ul style="list-style-type: none">- Einfluß d. zeitlichen Reihenfolge, in der Beanspruchungen aus V und α aufgebracht werden- f und e infolge V und α	7	9.7	A 21	

Versuchsserien mit bewehrten Elastomerlagern aus CR						
8	A 9	- f und e infolge V und α entsprechend Serie 1	33	11.1	A 22	190-226
9	A10	<ul style="list-style-type: none"> - w und e infolge Horizontal- und Vertikallast und Verdrehung ent- sprechend Serie 3 - aufnehmbar H 	11	11.2	A 23	227-248
10	A11	- Langzeitverhalten entsprechend Serie 4	5	11.3	A 24	
11	A12	- Einfluß der Mehr- fachverdrehung zwischen $\pm 0,03$ rad auf f und e bei konstanter Vertikallast ent- sprechend Serie 6	9	11.4	A 25	249-275
12	A13	<ul style="list-style-type: none"> - Einfluß der zeit- lichen Reihenfol- ge, in der V und α aufgebracht werden. - f und e infolge V und α entsprechend Serie 7 	6	11.5	A 26	276-277

Nr.	Elastomerlager (EPDM)		Beanspruchung*				Auswertungsdiagramm siehe Bild	
	Abmessungen		V		H	α		
	t** mm	a x b mm x mm	F ₁ +F ₃ kN	σ_m N/mm ²	F ₂ kN	rad	e (α)	f (α)
1.1 1.2 1.3 1.34	5	100x200	100	5,0	0	stufen- weise 0,000 0,005 0,010 . . 0,030 0,020 0,010 0,000	A 1	A16, A29
			200	10,0			A 2	A17, A30
			400	20,0			A 3	A18, A31
			600	30,0			A 4	A19, A32
1.4 1.5 1.6 1.35	10		100	5,0			A 1	A16, A29
			200	10,0			A 2	A17, A30
			400	20,0			A 3	A18, A31
			600	30,0			A 4	A19, A32
1.7 1.8 1.9	20		100	5,0			A 1	A16, A29
			200	10,0			A 2	A17, A30
			400	20,0			A 3	A18, A31
1.10 1.11 1.12 1.37	5		200x100	100			5,0	0
		200		10,0	A 6	A21, A34		
		400		20,0	A 7	A22, A35		
		600		30,0	A 8	A23, A36		
1.13 1.14 1.15 1.38	10	100		5,0	A 5	A20, A33		
		200		10,0	A 6	A21, A34		
		400		20,0	A 7	A22, A35		
		600		30,0	A 8	A23, A36		
1.16 1.17 1.18	20	100		5,0	A 5	A20, A33		
		200		10,0	A 6	A21, A34		
		400		20,0	A 7	A22, A35		
1.19 1.20 1.31	5	200x200		200	5,0	0	A 9 A 10 A 11 A 21 A 10 A 11 A 23 A 10 A 11 A 12 A 13 A 15 A 12 A 13 A 14 A 12 A 13	
			400	10,0	A25, A38			
			800	20,0	A26, A39			
1.21 1.22 1.32	10		200	5,0	A24, A37			
			400	10,0	A25, A38			
			800	20,0	A26, A39			
1.23 1.24 1.33	20		200	5,0	A24, A37			
			400	10,0	A25, A38			
			800	20,0	A26, A39			
1.25 1.26 1.39	5		150x200	150	5,0			A27, A40
				300	10,0			A28, A41
				600	20,0			A 43
1.27 1.28 1.36	10	150		5,0	A27, A40			
		300		10,0	A28, A41			
		900		30,0	A 42			
1.29 1.30	20	150		5,0	A27, A40			
		300		10,0	A28, A41			

* Nach dem Erreichen der angegebenen vertikalen Beanspruchung ($\sigma_m = 5,0; 10,0; 20,0$ oder $30,0 \text{ N/mm}^2$) - eine horizontale Belastung wurde nicht aufgebracht ($H = 0$) - wurde der Verdrehungswinkel α in Schritten von $\Delta\alpha = 0,0025 \text{ rad}$ bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 5 \text{ mm}$ und in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005 \text{ rad}$ bei den Lagern mit einer Dicke von $t = 10 \text{ mm}$ und 20 mm von 0 auf ca. $0,03 \text{ rad}$ gesteigert. Danach wurde die Verdrehung in Schritten von $0,01 \text{ rad}$ auf 0 zurückgeführt und das Lager entlastet.

Tabelle A 2: Versuchsprogramm Serie 1

Nr.	Oberflächenbeschaffenheit der angrenzenden Betonbau- teile	Lager, unbewehrt (EPDM) Abmessungen		Beanspruchung*			Auswertungs- diagramme siehe Bild A		
				V		H			
		t mm	a x b mm x mm	F ₁ +F ₂ kN	σ_m N/mm ²	F ₂ kN	α rad	e (α)	f (α) W
2.1	blanke Stahlfläche auf beiden Seiten des Lagers	5	200 x 200	200	5,0	0	stufen- weise verdrehen wie unten++	61	83
2.2		10		200	5,0			61	84
2.3		20		200	5,0			61	85
2.4		5		400	10,0			62	83
2.5		10		400	10,0			62	79,80 84
2.6		20		400	10,0			62	81,82 85
2.7	mit Schalöl getränkte Betonoberfläche ent- sprechend Serie 1 auf beiden Seiten des Lagers	5	200 x 200	200	5,0		2 x stufen- weise verdrehen wie unten++	63	86
2.8		10		200	5,0			64	87
2.9		20		200	5,0			65	88
2.10		5		400	10,0			66	86
2.11		10		400	10,0			67	79,80 87
2.12		20		400	10,0			68	81,82 88
2.13	mit sägerauhem Holz ge- schaltete Betonoberfläche auf beiden Seiten des Lagers	5	200 x 200	200	5,0		++	69	89
2.15		10		200	5,0			69	90
2.17		20		200	5,0			69	91
2.14		5		400	10,0			70	89
2.16		10		400	10,0			70	79,80 90
2.18		20		400	10,0			70	81,82 91
2.19	mit Handabzug auf einer Seite glatt auf einer Seite rau hergestellt Betonoberfläche auf bei- den Seiten des Lagers	5	200 x 200	200	5,0			71	92
2.21		10		200	5,0			71	93
2.23		20		200	5,0			71	94
2.20		5		400	10,0			72	92
2.22		10		400	10,0			72	79,80 93
2.24		20		400	10,0			72	81,82 94
2.25	mit kunststoffbeschich- teter Schalung herge- stellte glatte Betonober- fläche auf beiden Seiten des Lagers	5	200 x 200	200	5,0			73	95
2.27		10		200	5,0			73	96
2.29		20		200	5,0			73	97
2.26		5		400	10,0			74	95
2.28		10		400	10,0			74	79,80 96
2.30		20		400	10,0			74	81,82 97
2.31	glatte Betonoberfläche mit einzelnen größeren Vertiefungen infolge Wasseransammlung auf nicht saugender Schalung auf bei- den Seiten des Lagers	5	200 x 200	200	5,0		0	75	98
2.33		10		200	5,0			75	99
2.35		20		200	5,0			75	100
2.32		5		400	10,0			76	98
2.34		10		400	10,0			76	79,80 99
2.36		20		400	10,0			76	81,82 100
2.37	mit Handabzug hergestell- te Betonoberfläche ent- sprechend Serie 1 mit einem Wasserfilm von ca. 2 mm Dicke auf dem unteren Betonteil	5	200 x 200	200	5,0			77	101
2.39		10		200	5,0			77	102
2.41		20		200	5,0			77	103
2.42		5		400	10,0			78	101
2.40		10		400	10,0			78	79,80 102
2.42		20		400	10,0			78	81,82 103

* Nach dem Erreichen der angegebenen vertikalen Beanspruchung ($\sigma_m = 5,0$ oder $10,0$ N/mm²) - eine horizontale Belastung wurde nicht aufgebracht (H = 0) - wurde der Verdrehungswinkel α schrittweise wie bei Serie 1 aufgebracht. Danach wurde die Verdrehung zurückgefahren und das Lager entlastet.

Tabelle A 3: Versuchsprogramm Serie 2

Nr.	Elastomerlager (EPDM)		Beanspruchung*					Auswertungsdiagramme siehe Bild			
	Abmessungen		V		H		α	e (α)	W (α)	W (H)	
	t mm	a x b mm x mm	F ₁ +F ₃ kN	σ_m N/mm ²	1. Zyklus F ₂ kN	2. Zyklus F ₂ kN	rad				
3.1	5	200x200	200	5,0	29,2	-	stufen- weise	A 110	A 118	A 125	
3.2			400	10,0	29,2	58,4		A 111	A 119	A 126	
3.3	10		200	5,0	29,2	-		0,000	A 110	A 118	A 127
3.4			400	10,0	29,2	58,4		0,005	A 112	A 120	A 128
3.5	20		200	5,0	29,2	-		0,010	A 110	A 118	A 129
3.6			400	10,0	29,2	58,4		:	A 113	A 121	A 130
3.7	10	200x100	100	5,0	14,6	-	0,030	A 114	A 122	A 131	
3.8			200	10,0	14,6	29,2	0,020	A 115	A 123	A 132	
3.9	10	100x200	100	5,0	14,6	-	0,010	A 116	A 124	A 133	
3.10			200	10,0	14,6	29,2	0,000	A 117	A 125	A 134	

* Nach dem Erreichen der angegebenen Vertikallast wird die Horizontallast in 4 Stufen aufgebracht. Dann wird der Verdrehungswinkel α stufenweise bis auf 0,03 rad gesteigert und anschließend auf 0,000 rad zurückgefahren. Bei den Versuchen mit einer mittleren Spannung von $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$ wird, ohne die Vertikallast zurückzunehmen, in einem 2. Belastungszyklus die H-Kraft gesteigert und dann wiederum die Verdrehung aufgebracht.

Tabelle A 4: Versuchsprogramm Serie 3

Nr.	Elastomerlager (EPDM)		Beanspruchung				Standzeit* der Ver- suche	Auswertungsdiagramme siehe Bild
	Abmessungen		V		α	Belastungsvorgang		
	t mm	a x b mm x mm	$F_1 + F_3$ kN	σ_m N/mm ²	rad		h	
4.1 4.2	10	200x200	200 400	5,0 10,0	0,030	1. σ_m wurde in 4 Last- stufen aufgebracht	3,5 h	A 135 - A 138
4.3 4.4	20	200x200	200 400	5,0 10,0		2. α wurde in Schrit- ten von $\Delta\alpha =$ 0,005 rad aufge- bracht		
4.5 4.6	10	200x100	200 400	10,0 20,0				
4.7 4.8	20	200x200	200 400	5,0 10,0		V und α wurden nach- einander in je einem Schritt aufgebracht		

* Im Verlauf der Standzeit der Versuche wurden 9 Verformungsmessungen unter maximaler Last und Verdrehung durchgeführt.

Tabelle A 5: Versuchsprogramm Serie 4

Nr.	Elastomerlager (EPDM)		Beanspruchung*				Auswertungsdiagramme siehe Bild		
	Abmessungen		V		H	α	$e_{(\alpha)}$	$f_{\text{exz}(\alpha)}$	$f_{\text{zentr}(\alpha)}$
	t mm	a x b mm x mm	F_1+F_3 kN	σ_m N/mm ²	F_2 kN	rad			
5.1	5	200x200	200	5,0	0	stufen- weise 0,000 0,005 0,010 : 0,030 0,020 0,010 0,000	A 139	A 140	A 141
5.2			400	10,0			A 142	A 143	A 144
5.3	10		200	5,0			A 145	A 146	A 147
5.4			400	10,0			A 148	A 149	A 150
5.5	20		200	5,0			A 151	A 152	A 153
5.6			400	10,0			A 154	A 155	A 156
5.7	10	200x100	100	5,0			A 157	A 158	A 159
5.8			200	10,0			A 160	A 161	A 162
5.9			400	20,0			A 163	A 164	A 165

* Nach dem Erreichen der angegebenen vertikalen Beanspruchung - eine horizontale Belastung wurde nicht aufgebracht - wurde der Verdrehungswinkel $\alpha = 0,03$ rad gesteigert. Danach wurde die Verdrehung zurückgenommen und das Lager entlastet. In jedem der neun Versuche wurde der Belastungs- und Verdrehungsvorgang 3mal durchgeführt.

Tabelle A6: Versuchsprogramm Serie 5

Nr.	Elastormerlager (EPDM)		Beanspruchung*				Auswertungsdiagramme siehe Bild	
	Abmessungen		V		H	α	$e(\alpha)$	$f_{\text{exz}}(\alpha)$ $f_{\text{zentr}}(\alpha)$
	t mm	a x b mm x mm	F_1+F_3 kN	σ_m N/mm	F_2 kN	rad		
6.1	5	200x200	200	5,0	0	Die Verdrehung wurde zwischen den Werten $\alpha = \pm 0,030$ rad stufenweise in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005$ rad 3mal wiederholt	A 166	A 167
6.2			400	10,0			A 168	A 169
6.3	10		200	5,0			A 170	A 171
6.4			400	10,0			A 172	A 173
6.5	20		200	5,0			A 174	A 175, A 176
6.6			400	10,0			A 177	A 178, A 179
6.7	10	200x100	100	5,0			A 180	A 183, A 184
6.8			200	10,0			A 181	A 183, A 184
6.9			400	20,0			A 182	A 183, A 184
6.10	10	100x200	100	5,0			A 185	A 188, A 189
6.11			200	10,0			A 186	A 188, A 189
6.12			400	20,0			A 187	A 188, A 189

* Die Verdrehung wurde nach dem Erreichen der angegebenen vertikalen Beanspruchung aufgebracht.

Tabelle A7: Versuchsprogramm Serie 6

Nr.	Elastomerlager (EPDM)		Beanspruchung			
	Abmessungen		V		α	Belastungsvorgang
	t mm	a x b mm x mm	$F_1 + F_3$ kN	σ_m N/mm ²	rad	
7.1	10	200x200	200	5,0	0,015= konst.	1. Aufbringen einer Ver- drehung von $\alpha = 0,015$ rad 2. Aufbringen der Ver- tikallast in Stufen von $\Delta V = 40$ kN
7.2			400	10,0		
7.3	20		200	5,0		
7.4			400	10,0		
7.5	10	100x200	100	5,0		
7.6			200	10,0		
7.7			400	20,0		

Tabelle A8: Versuchsprogramm Serie 7

Nr.	Elastomerlager (CR) bewehrt			Beanspruchung*				Auswertungsdiagramme siehe Bild A		
	Abmessungen			V		H	α			
	a x b x d mm	T mm	n	$F_1 + F_3$ kN	σ_m N/mm ²	F_2 kN	rad	$e(\alpha)$	$f_{zen}(\alpha)$	$f_{exz}(\alpha)$
8.1 8.2	100x150x35	25	4	150 300	10,0 20,0	0	stufen- weise	190 190	191 191	192 192
8.3	150x100x35	25	4	150	10,0		0,000	193	194	194
8.4	150x200x14	10	1	300	10,0		0,005	195	196	196
8.5 8.6	200x150x14	10	1	150 300	5,0 10,0		0,010	197	198	198
8.7 8.8 8.9 8.10 8.11	150x200x35	25	4	150 300 450 600 900	5,0 10,0 15,0 20,0 30,0		...	197	198	198
8.12 8.13 8.14 8.15 8.16	200x150x35	25	4	150 300 450 600 900	5,0 10,0 15,0 20,0 30,0		0,030	199	200	201
8.17	150x200x56	40	7	300	10,0		0,020	199	200	201
8.18 8.19 8.20	200x150x56	40	7	150 300 450	5,0 10,0 15,0		0,010	199	200	201
8.21 8.22	200x250x52		4	500 750	10,0 15,0		0,000	199	200	201
8.23 8.24	250x200x52	37	4	500 750	10,0 15,0			202	203	204
8.25	250x300x52	37	4	750	10,0			202	203	204
8.26	300x250x52	37	4	750	10,0			202	203	204
8.27 8.28 8.29 8.30 8.31	∅ 200x52	37	4	157 314 471 628 942	5,0 10,0 15,0 20,0 30,0			202	203	204
8.32 8.33	∅ 250x52	37	4	491 736	10,0 15,0			202	203	204
								205	206	207
								208	209	210
								208	209	210
								208	209	210
								211	212	213
								211	212	213
								214	215	216
								214	215	216
								217	218	218
								219	220	220
								221	222	223
								221	222	223
								221	222	223
								221	222	223
								221	222	223
								224	225	226
								224	225	226

* Nach dem Erreichen der angegebenen vertikalen Beanspruchung wurde der Verdrehungswinkel α stufenweise aufgebracht. Danach wurde die Verdrehung zurückgefahren und das Lager entlastet.

Tabelle A 9 : Versuchsprogramm Serie 8

Nr.	Elastomerlager (CR) bewehrt			Beanspruchung*					Auswertungsdiagramme siehe Bild	
	Abmessungen			V		H		α		
	a x b x d mm	T	n	F ₁ +F ₃ kN	σ_m N/mm ²	1. Zyklus F ₂ kN	2. Zyklus F ₂ kN	rad	e (α)	w (H)
9.1	150x200x35	25	4	150	5,0	21,0	-	stufen- weise 0,000 0,005 0,010 : 0,030 0,020 0,010 0,000	A 227	A 228
9.2				300	10,0	21,0	42,0		A 229	A 230
9.3				450	15,0	21,0	42,0		A 231	A 232
9.4	200x150x35	25	4	150	5,0	21,0	-		A 233	A 234
9.5				300	10,0	21,0	42,0		A 235	A 236
9.6				450	15,0	21,0	42,0		A 237	A 238
9.7	200x250x52	37	4	500	10,0	35,0	70,0		A 239	A 240
9.8				750	15,0	35,0	70,0		A 241	A 242
9.9	ø 200x52	37	4	157	5,0	22,0	-		A 243	A 244
9.10				314	10,0	22,0	44,0		A 245	A 246
9.11				471	15,0	22,0	44,0		A 247	A 248

* Nach dem Erreichen der angegebenen Vertikallast wird die Horizontallast in 4 Stufen aufgebracht. Dann wird der Verdrehungswinkel α stufenweise gesteigert und anschließend auf 0,000 zurückgefahren. In einem 2. Belastungszyklus wird, bei konstanter Vertikallast, die H-Kraft gesteigert und dann wiederum die Verdrehung aufgebracht.

Tabelle A 10: Versuchsprogramm Serie 9

Nr.	Elastomerlager (CR) bewehrt			Beanspruchung				Standzeit* der Ver- suche
	Abmessungen			V		α	Belastungsvorgang	
	a x b x d mm	T mm	n	F ₁ +F ₃ kN	σ_m N/mm ²	rad		
10.1	150x200x35	25	4	150	5,0	0,03	1. σ_m wurde in 4 Laststufen auf- gebracht	3,0 h
10.2				300	10,0		2. α wurde in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005$ rad aufgebracht	
10.3				450	15,0			
10.4				300	10,0	0,03	V und α wurden nacheinander in je einem Schritt aufgebracht	
10.5				450	15,0			

* Im Verlauf der Standzeit der Versuche wurden 9 Verformungsmessungen unter maximaler Last und Verdrehung durchgeführt.

Tabelle A11: Versuchsprogramm Serie 10

Nr.	Elastomerlager (CR) bewehrt			Beanspruchung *				Auswertungsdiagramme siehe Bild		
	Abmessungen			V		H	α			
	a x b x d mm	T mm	n	F_1+F_3 kN	σ_m N/mm ²	F ₂ kN	rad	e _(α)	f _{zen(α)}	f _{exz(α)}
11.1	150x200x35	25	4	150	5,0	0	Nach dem Auf- bringen von V wurde die Verdrehung zwischen den Werten $\alpha = \pm 0,030 \text{ rad}$ in Schritten von $\Delta\alpha = 0,005 \text{ rad}$ 3mal wieder- holt	A 249	A 250	A 251
11.2				300	10,0			A 252	A 253	A 254
11.3				450	15,0			A 255	A 256	A 257
11.4	200x150x35	25	4	150	5,0			A 258	A 259	A 260
11.5				300	10,0			A 261	A 262	A 263
11.6				450	15,0			A 264	A 265	A 266
11.7	200x250x52	37	4	500	10,0			A 267	A 268	A 269
11.8	ø 200x52	37	4	314	10,0			A 270	A 271	A 272
11.9				471	15,0			A 273	A 274	A 275

Tabelle A 12: Versuchsprogramm Serie 11

Nr.	Elastomerlager (CR) bewehrt			Beanspruchung				Belastungsvorgang	Auswertungsdiagramme siehe Bild
	Abmessungen			V		H	α		
	a x b x d mm	T mm	n	$F_1 + F_3$ kN	σ_m N/mm ²	F_2 kN	rad		e (v)
12.1	150x200x35	25	4	150	5,0	0	0,015= konst.	1. Aufbringen einer Verdrehung von $\alpha=0,015$ rad	A 276
12.2				300	10,0				
12.3				450	15,0				
12.4	ø 200x52	37	4	157	5,0			2. Aufbringen der Vertikallast in Stufen von $\Delta V = 40$ kN	A 277
12.5				314	10,0				
12.6				471	15,0				

Tabelle A 13: Versuchsprogramm Serie 12

a x b [mm x mm]		200 x 200			200 x 100			150 x 200			100 x 200		
t [mm]		5	10	20	5	10	20	5	10	20	5	10	20
$S = \frac{\text{gedrückte Fl.}}{\text{freie Fläche}} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot t \cdot (a+b)}$		10,00	5,00	2,50	6,67	3,33	1,67	8,57	4,29	2,14	6,67	3,33	1,67
V	zul $\sigma_m = 1,2 \cdot S \text{ [N/mm}^2\text{]}$ $\leq 5,0 \text{ N/mm}^2$	5,00	5,00	3,00	5,00	4,00	2,00	5,00	5,00	2,57	5,00	4,00	2,00
	zul V = zul $\sigma_m \cdot a \cdot b \text{ [kN]}$	200	200	120	100	80	40	150	150	77	100	60	30
$f_{\text{rechn}} = 0,15 \cdot t \text{ [mm]}$		0,75	1,50	3,00	0,75	1,50	3,00	0,75	1,50	3,00	0,75	1,50	3,00
H	zul H = $0,2 \cdot \sigma_m \cdot a \cdot b$ (d.h. zul $\mu = 0,2$) max zul H = $0,2 \cdot \text{zul } \sigma_m \cdot a \cdot b \text{ [kN]}$	40	40	24	20	16	8	30	30	15,4	20	16	8
	zul tan $\gamma = 0,7$; $G = 1,0 \text{ N/mm}^2$ zul H = zul tan $\gamma \cdot G \cdot a \cdot b \text{ [kN]}$ zul w = zul tan $\gamma \cdot t \text{ [mm]}$	28 3,5	28 7,0	28 14,0	14 3,5	14 7,0	14 14,0	21 3,5	21 7,0	21 14,0	14 3,5	14 7,0	14 14,0
M	$M(\alpha=0,001) = \frac{a^5 \cdot b}{75 \cdot t^3} \cdot G \cdot 0,001 \text{ [kNm]}$	6,83	0,85	0,107	3,41	0,427	0,053	1,62	0,203	0,025	0,213	0,027	0,003
	zul $\alpha = 0,2 \cdot t/a \text{ [rad]}$	0,005	0,010	0,020	0,005	0,010	0,020	0,007	0,013	0,027	0,010	0,020	0,040
e	$e \left(\begin{matrix} \alpha = 0,001 \text{ rad} \\ \sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2 \end{matrix} \right) = \frac{M}{V} \text{ [mm]}$	34,1	4,27	0,53	34,1	4,27	0,53	10,8	1,35	0,17	2,13	0,27	0,03

Tabelle A 14: Zulässige Beanspruchungen unbewehrter Lager

t	a x b	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e
		$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$															
		$\alpha = 0,000 \text{ rad}$				$\alpha = 0,010 \text{ rad}$				$\alpha = 0,020 \text{ rad}$				$\alpha = 0,030 \text{ rad}$			
5	100 x 200	1,143	1,143	- 0,076	- 2,591	1,168	1,307	0,295	14,353	1,108	1,675	1,301	28,332	-	-	-	-
10		1,293	1,293	- 0,258	- 1,459	1,398	1,465	0,168	6,824	1,475	1,790	1,165	15,743	1,430	2,065	2,108	21,223
20		3,685	3,685	- 0,313	- 2,892	3,868	3,883	0,277	1,556	3,980	4,088	1,317	5,400	4,025	4,308	2,269	9,427
5	200 x 100	0,720	0,718	- 0,082	-18,043	0,658	1,143	0,573	48,159	0,178	1,580	1,627	69,533	-	-	-	-
10		1,400	1,399	- 0,144	16,784	1,243	1,684	0,885	43,745	0,905	1,929	2,140	51,206	0,485	2,247	3,504	58,631
20		3,998	3,997	- 0,336	- 1,754	4,513	4,633	0,329	12,153	4,488	4,973	1,364	24,311	4,395	5,456	2,394	35,376
5	200 x 200	0,853	0,852	- 0,190	- 4,741	0,727	1,205	0,592	48,212	0,290	1,588	1,850	64,405	-0,183	2,023	3,454	73,348
10		1,258	1,258	- 0,019	18,385	1,323	1,797	1,049	47,659	1,015	2,187	2,322	58,461	0,573	2,494	3,605	64,220
20		2,608	2,608	- 0,398	- 1,144	2,883	2,987	0,467	10,389	3,043	3,465	1,870	21,216	3,208	4,238	3,551	34,439
5	150 x 200	0,838	0,837	- 0,097	- 4,248	0,818	1,106	0,701	28,705	0,605	1,499	1,993	44,695	0,258	1,790	2,983	51,050
10		1,290	1,290	- 0,149	- 5,563	1,348	1,477	0,537	12,725	1,350	1,882	1,623	26,596	1,303	2,377	2,904	35,876
20		2,773	2,772	- 0,188	0,052	3,073	3,147	0,536	7,371	3,155	3,399	1,732	12,148	3,198	3,849	2,966	21,618

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 15.1: Versuchsergebnisse Serie 1 (für $\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$)

t	a x b	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e
		$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$															
		$\alpha = 0,000 \text{ rad}$				$\alpha = 0,010 \text{ rad}$				$\alpha = 0,020 \text{ rad}$				$\alpha = 0,030 \text{ rad}$			
5	100 x 200	1,205	1,204	- 0,079	- 6,168	1,278	1,341	0,495	6,364	1,298	1,628	1,775	16,467	-	-	-	-
10		2,118	2,117	- 0,357	1,640	2,165	2,248	0,244	8,454	2,163	2,467	1,340	15,239	2,195	2,803	2,627	20,350
20		6,520	6,520	- 1,915	- 6,396	6,760	6,752	- 1,534	-0,793	6,845	6,934	0,632	4,484	6,890	7,181	0,397	9,728
5	200 x 100	1,048	1,048	- 0,009	3,844	0,938	1,371	0,841	43,520	0,555	1,770	2,129	60,615	0,040	2,199	3,564	71,647
10		1,895	1,895	- 0,477	7,787	1,865	2,258	0,619	39,077	1,605	2,712	1,933	55,315	1,220	3,101	3,393	62,686
20		6,305	6,305	- 0,601	- 2,453	7,060	7,187	0,274	12,742	7,020	7,545	1,515	26,212	6,853	8,062	2,718	40,188
5	200 x 200	1,223	1,222	- 0,156	- 8,624	1,155	1,550	0,887	39,884	0,812	2,008	2,289	59,628	0,457	2,636	4,672	72,614
10		1,985	1,985	- 0,329	4,077	2,035	2,327	0,461	29,332	2,000	3,030	2,259	51,626	1,778	3,678	4,589	63,459
20		5,510	5,511	- 2,210	- 4,569	5,863	5,942	- 1,364	7,923	6,020	6,411	0,257	19,497	6,015	6,999	1,909	32,727
5	150 x 200	1,175	1,175	- 0,615	- 6,902	1,208	1,389	1,006	18,189	1,078	1,809	2,655	36,554	0,845	2,273	4,314	47,550
10		1,905	1,905	- 0,334	- 2,288	1,983	2,084	0,807	10,245	2,045	2,444	2,750	19,950	2,045	2,992	4,742	31,582
20		5,173	5,173	- 0,341	2,039	5,770	5,873	1,077	10,306	5,933	6,235	2,668	15,043	5,987	6,619	4,167	21,066

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 15.2: Versuchsergebnisse Serie 1 (für $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$)

t	a x b	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e
		$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$															
		$\alpha = 0,000 \text{ rad}$				$\alpha = 0,010 \text{ rad}$				$\alpha = 0,020 \text{ rad}$				$\alpha = 0,030 \text{ rad}$			
5	100 x 200	1,853	1,853	- 0,120	- 4,393	1,995	2,068	0,774	7,479	-	-	-	-	-	-	-	-
10		2,978	2,978	- 1,981	- 0,918	3,205	3,287	- 1,759	8,276	3,270	3,619	- 0,440	17,528	3,258	4,118	1,373	28,530
20		9,863	9,862	- 4,257	- 4,891	10,230	10,285	- 3,551	5,451	10,315	10,631	- 2,043	15,732	10,238	10,995	- 0,578	25,280
5	200 x 100	1,635	1,635	- 0,129	2,754	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10		3,550	3,550	- 1,309	- 2,068	3,635	3,965	0,165	33,009	3,370	4,432	2,649	53,184	2,918	5,022	4,808	70,124
20		10,150	10,150	- 0,709	0,377	10,333	10,579	0,435	24,655	10,220	11,131	1,970	45,527	9,900	11,731	3,705	61,046
5	200 x 200	1,498	1,498	- 0,027	2,273	1,500	1,809	1,641	30,852	1,305	2,258	3,503	47,559	0,893	2,784	5,070	63,025
10		3,748	3,748	3,086	1,533	3,995	4,232	6,071	23,558	3,955	4,801	9,042	42,355	3,723	5,477	11,667	58,508
20		9,083	9,082	7,256	2,877	9,400	9,604	10,117	20,477	9,403	10,180	12,430	38,854	9,273	10,904	14,676	54,303
5	150 x 200	1,638	1,638	- 0,292	0,511	1,655	1,882	0,428	22,741	1,585	2,311	1,939	36,387	1,233	2,627	2,696	46,441

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 15.3: Versuchsergebnisse Serie 1 (für $\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$)

t	a x b	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e
		$\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$															
		$\alpha = 0,000 \text{ rad}$				$\alpha = 0,010 \text{ rad}$				$\alpha = 0,020 \text{ rad}$				$\alpha = 0,030 \text{ rad}$			
5	100 x 200	1,908	1,908	2,217	- 3,065	2,060	2,134	4,329	7,438	2,068	2,453	6,267	19,272	2,060	3,005	8,680	31,490
10		4,763	4,762	7,904	- 1,157	4,918	5,055	9,821	13,842	5,015	5,538	12,351	26,194	4,980	6,142	14,477	38,738
5	200 x 100	2,290	2,290	1,339	- 4,001	2,495	2,882	2,973	38,585	2,175	3,517	4,428	67,091	1,668	4,126	6,236	81,825
10		5,255	5,255	1,932	- 3,769	5,445	5,752	3,899	30,594	5,248	6,406	5,841	58,024	4,823	7,219	7,865	79,840
5	150 x 200	1,638	1,638	- 0,292	0,511	1,655	1,882	0,428	22,741	1,585	2,311	1,939	36,387	1,233	2,627	2,696	46,441
10																	

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 15.4: Versuchsergebnisse Serie 1 (für $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$)

	Oberflächen der angrenzenden Betonteile	$f_{zen} = f_{exz}$	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e	$f_{zen} = f_{exz}$	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e
t	a x b = 200 x 200	$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$							$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$						
		$\alpha = 0,000 \text{ rad}$				$\alpha = 0,020 \text{ rad}$			$\alpha = 0,000 \text{ rad}$				$\alpha = 0,020 \text{ rad}$		
5,0	blanke	0,950	- 0,045	0,174	1,058	2,284	4,081	61,255	1,873	- 0,510	3,809	2,045	3,492	4,774	72,169
10,0	Stahlfäche	1,510	- 0,122	- 1,952	2,125	2,923	2,917	39,918	3,598	0,432	0,829	4,405	5,447	4,812	52,162
20,0		3,335	- 0,163	- 4,210	3,883	4,297	2,653	20,640	7,710	- 1,197	2,405	8,120	8,766	1,911	32,099
5,0	mit Schalöl	0,885	- 0,047	- 9,043	0,483	1,802	2,147	65,719	1,255	- 0,013	2,090	0,855	2,075	3,308	60,993
10,0	getränkte	1,363	- 0,396	- 5,543	1,450	2,279	2,078	41,474	2,335	0,009	- 0,558	2,508	3,478	4,134	48,610
20,0	Betonfläche	3,293	- 0,531	- 1,096	3,525	4,058	1,938	26,514	4,823	- 0,160	- 1,846	5,263	5,854	3,503	29,467
5,0	mit sägerauhem	1,170	- 0,306	32,564	0,128	1,599	0,795	73,213	1,320	- 0,651	14,155	0,545	2,075	0,557	76,515
10,0	Holz geschalte	1,183	- 0,821	1,229	0,947	2,061	0,422	55,485	1,593	- 0,587	10,163	1,305	2,344	1,392	51,956
20,0	Betonfläche	2,755	- 1,113	0,902	2,905	3,485	0,490	29,111	3,928	- 2,007	1,462	4,020	4,495	0,137	23,794
5,0	1 Seite rauh,	1,063	- 0,407	24,196	0,290	1,637	1,205	67,383	1,265	- 0,830	17,284	0,600	1,831	0,880	61,605
10,0	1 Seite glatt	1,250	- 0,719	12,137	0,890	1,939	1,035	52,648	1,863	- 1,409	6,979	1,630	2,488	0,469	43,135
20,0	mit Handabzug hergest. Betonfl.	2,848	- 0,901	2,575	3,005	3,605	0,757	30,020	5,068	- 2,458	- 0,437	5,263	5,730	- 0,704	23,315
5,0	glatte	0,978	- 0,435	9,692	0,108	1,666	0,594	77,731	1,178	- 1,033	- 13,184	0,642	2,136	0,084	74,546
10,0	Beton-	0,970	- 0,787	1,615	0,767	1,935	0,518	58,553	1,478	- 1,349	- 1,316	1,518	2,483	0,412	48,323
20,0	oberfläche	2,365	- 1,120	- 0,014	2,625	3,177	0,840	27,603	4,055	- 2,405	0,905	4,108	4,626	- 0,266	25,966
5,0	glatte Betonfl.	1,030	- 0,157	- 2,176	0,150	1,755	1,112	80,275	1,168	- 0,239	16,006	0,337	1,825	1,561	74,284
10,0	mit einzelnen	1,063	- 0,287	0,490	0,800	1,920	1,225	55,983	1,595	- 0,682	3,374	1,415	2,412	1,278	49,814
20,0	größeren Ver- tiefungen	2,415	- 0,723	0,588	2,498	3,022	1,174	26,280	3,810	- 0,722	0,206	3,865	4,342	1,659	23,892
5,0	Wasser auf der	0,838	- 0,367	13,998	0,155	1,460	1,086	65,105	1,256	- 0,628	11,051	0,820	1,963	0,730	57,146
10,0	unteren	1,300	- 0,726	9,582	1,020	2,006	0,810	49,328	2,143	- 1,309	- 1,491	2,185	2,875	0,242	34,657
20,0	Betonfläche	3,020	- 0,662	- 0,834	3,578	4,019	1,030	22,055	6,088	- 1,453	0,466	6,420	6,945	0,148	26,230

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 16: Versuchsergebnisse Serie 2

t	a x b	V	σ_m	H	α	f_{zen}	w	e	H	α	w	e	H	α	w	e
mm	mm x mm	kN	N/mm ²	1. Aufbringen der Horizontallast					2. Verdrehung unter H = const, V = const				3. Verdrehung unter erhöhter H-Last			
5,0	200 x 200	200	5,0	7,3 14,7 22,1 29,3	0,000	0,800 0,790 0,753 0,708	0,972 3,668 6,675 9,268	-11,311 -11,396 -11,267 -11,997	29,3	0,005 0,010 0,020 0,030	11,456 12,961 19,521 32,016	18,740 48,954 67,067 80,746				
5,0	200 x 200	400	10,0	14,5 29,1	0,000	1,075 1,035	2,321 6,001	- 1,901 0,322	29,1	0,005 0,010 0,020 0,030	7,407 8,675 11,174 13,829	23,455 40,133 58,434 71,907	54,7	0,005 0,010	27,308 33,894	42,11 56,84
10,0	200 x 200	200	5,0	7,4 14,7 22,1 29,4	0,000	1,373 1,470 1,538 1,658	1,640 5,094 8,682 13,621	- 9,407 - 7,015 - 5,468 - 0,765	29,4	0,005 0,010 0,020 -	18,769 22,584 30,443 -	18,295 30,458 59,747 -				
10,0	200 x 200	400	10,0	14,6 29,1		1,578 1,500	3,242 7,128	2,251 5,709	29,1	0,005 0,010 0,020 0,030	8,528 9,782 12,112 14,180	20,786 28,303 44,953 58,475	58,8	0,005 0,010 0,020 0,030	20,719 21,945 24,099 26,488	29,763 37,863 53,596 63,249
20,0	200 x 200	200	5,0	7,3 14,7 22,0 29,4	0,000	3,013 3,050 3,420 3,513	2,253 5,697 12,519 17,493	- 0,924 0,540 6,020 7,628	29,3	0,005 0,010 0,020 0,030	21,229 23,566 26,755 29,848	16,408 26,602 38,483 50,269				
20,0	200 x 200	400	10,0	14,5 29,0		4,770 4,703	3,046 10,427	3,854 8,737	29,1	0,005 0,010 0,020 0,030	12,346 13,401 15,798 18,523	16,056 22,321 33,862 41,897	58,3	0,005 0,010 0,020 -	35,989 39,089 43,840 -	31,595 40,523 57,902 -
10,0	200 x 100	100	5,0	3,6 7,3 11,0 14,7	0,000	1,560 1,718 1,998 2,108	0,705 3,325 7,468 10,310	- 0,632 1,064 4,218 3,979	14,6	0,005 0,010 0,020 0,030	13,765 15,779 22,733 33,901	23,280 37,603 53,236 68,191				
10,0	200 x 100	200	10,0	7,2 14,5		2,333 2,315	-0,019 1,089	0,364 - 1,274	14,5	0,005 0,010 0,020 0,030	3,371 7,613 14,570 20,437	9,727 16,077 52,896 75,622	29,2	0,005 0,010 0,020 -	33,346 36,359 44,217 -	12,206 39,656 64,411 -
10,0	100 x 200	100	5,0	3,7 7,4 11,0 14,7	0,000	1,510 1,675 2,108 2,403	1,103 4,229 10,336 16,816	- 2,364 - 1,565 0,869 6,850	14,7	0,005 0,010 0,020 0,030	18,977 20,716 24,468 30,875	2,634 22,723 30,790 36,726				
10,0	100 x 200	200	10,0	7,3 14,6	0,000	2,163 2,225	1,496 6,824	2,010 4,712	14,6	0,005 0,010 0,020 0,030	8,737 9,945 11,463 13,268	10,045 14,115 21,730 28,134	29,3	0,005 0,010 0,020 0,030	21,752 23,904 28,890 33,388	18,796 23,326 32,409 42,286

Alle Angaben in N/mm², mm und rad

Tabelle A17: Versuchsergebnisse Serie 3

Nr.	a x b x t mm	α rad	σ_m N/mm ²	Verfor- mungen mm	Zeit nach dem Aufbringen der Belastung und der Verdrehung min								
					0 : 00	~ 1 : 36	~ 3 : 00	~ 6 : 00	~ 12 : 00	~ 24 : 00	~ 48 : 00	~ 96 : 00	~ 192 : 00
4.1	200 x 200 x 10	0,030	5,0	f_{zen}	0,575	0,592	0,602	0,618	0,638	0,665	0,703	0,720	0,760
				f_{exz}	2,379	2,384	2,391	2,394	2,406	2,433	2,462	2,482	2,523
				e	60,114	59,703	59,619	59,276	59,020	59,016	58,788	58,737	58,744
4.2	200 x 200 x 10	0,030	10,0	f_{zen}	1,575	1,600	1,615	1,645	1,675	1,723	1,798	1,858	1,905
				f_{exz}	3,304	3,331	3,363	3,398	3,432	3,509	3,619	3,696	3,746
				e	57,732	57,820	58,273	58,450	58,644	59,494	60,732	61,264	61,300
4.3	200 x 200 x 20	0,030	5,0	f_{zen}	2,970	3,010	3,035	3,060	3,088	3,120	3,163	3,203	3,248
				f_{exz}	4,077	4,116	4,136	4,161	4,185	4,232	4,269	4,319	4,353
				e	36,895	36,874	36,717	36,744	36,652	37,085	36,930	37,188	36,846
4.4	200 x 200 x 20	0,030	10,0	f_{zen}	6,175	6,188	6,203	6,213	6,250	6,295	6,343	6,403	6,468
				f_{exz}	7,267	7,268	7,277	7,289	7,316	7,355	7,411	7,467	7,544
				e	36,444	36,077	35,870	35,857	35,514	35,360	35,598	35,490	35,859
4.5	200 x 100 x 10	0,030	10,0	f_{zen}	1,880	1,893	1,900	1,918	1,925	1,948	1,958	1,973	1,995
				f_{exz}	3,426	3,432	3,433	3,444	3,446	3,460	3,465	3,475	3,500
				e	51,476	51,267	51,048	50,835	50,682	50,400	50,269	50,088	50,162
4.6	200 x 100 x 10	0,030	20,0	f_{zen}	2,635	2,653	2,653	2,660	2,673	2,693	2,705	2,723	2,748
				f_{exz}	4,224	4,230	4,224	4,219	4,222	4,232	4,233	4,258	4,268
				e	52,938	52,548	52,358	51,966	51,663	51,317	50,978	51,175	50,711
4.7 ⁺	200 x 200 x 20	0,030	5,0	f_{zen}	3,133	3,188	3,205	3,243	3,285	3,338	3,363	3,428	3,485
				f_{exz}	4,199	4,231	4,254	4,279	4,311	4,348	4,378	4,427	4,483
				e	35,579	34,836	34,942	34,547	34,242	33,747	33,838	33,338	33,240
4.8 ⁺	200 x 200 x 20	0,030	10,0	f_{zen}	5,275	5,300	5,315	5,343	5,380	5,418	5,460	5,503	5,583
				f_{exz}	6,133	6,143	6,155	6,175	6,200	6,224	6,266	6,299	6,327
				e	28,635	28,166	27,988	27,720	27,327	26,905	26,836	26,553	26,504

⁺Bei den Versuchen 4.7 und 4.8 wurde sowohl die Belastung wie auch die Verdrehung in je einem Schritt aufgebracht.

Alle Angaben in N/mm², mm und rad

Tabelle A18: Versuchsergebnisse Serie 4

Nr.	Elastomerlager (EPDM)		1. Beanspruchungszyklus				2. Beanspruchungszyklus				3. Beanspruchungszyklus				
	Abmessungen		σ_m [N/mm ²]	$\alpha = 0,000 \text{ rad}$											
	t mm	a x b mm x mm		f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e
5.1	5	200x200	5,0	1,068	1,068	-0,247	6,379	1,243		0,260	5,437	1,288		0,576	5,51
5.2	5		10,0	1,335	1,335	-0,318	-3,445	1,458		0,280	-0,629	1,493		0,589	-0,62
5.3	10		5,0	1,365	1,365	-0,306	4,283	1,603		-0,115	5,945	1,625		-0,106	6,12
5.4	10		10,0	1,958	1,958	-0,541	2,209	2,108		-0,528	1,027	2,165		-0,536	0,12
5.5	20	200x100	5,0	2,860	2,860	-0,434	1,019	3,153		-0,421	-0,771	3,238		-0,511	-0,14
5.6	20		10,0	4,485	4,485	-0,490	1,347	4,830		-0,205	0,807	5,068		-0,057	-1,72
5.7	10		5,0	1,248	1,248	-0,335	2,601	1,490		-0,079	2,839	1,533		-0,054	2,31
5.8	10		10,0	1,930	1,930	-0,763	0,510	2,183		-0,718	0,930	2,273		-1,009	-2,61
5.9	10	20,0	2,735	2,735	-1,955	-0,857	3,083		-1,309	-3,166	3,190		-1,293	-4,62	
$\alpha = 0,010 \text{ rad}$															
5.1	5	200x200	5,0	0,928	1,384	0,409	45,807	1,053	1,540	0,898	48,737	1,093	1,577	1,272	48,52
5.2	5		10,0	1,288	1,594	0,495	30,693	1,400	1,750	0,997	35,072	1,433	1,782	1,320	34,92
5.3	10		5,0	1,305	1,607	0,360	30,251	1,520	1,854	0,582	33,444	1,560	1,887	0,615	32,72
5.4	10		10,0	1,985	2,203	0,334	21,865	2,130	2,356	0,397	22,604	2,190	2,409	0,378	21,82
5.5	20	200x100	5,0	3,025	3,167	0,367	14,268	3,295	3,413	0,453	11,825	3,318	3,453	0,392	13,52
5.6	20		10,0	4,655	4,803	0,703	14,749	4,970	5,080	1,039	11,008	5,155	5,270	1,301	11,52
5.7	10		5,0	1,245	1,496	0,432	25,206	1,493	1,764	0,579	27,227	1,530	1,795	0,634	26,52
5.8	10		10,0	1,998	2,254	-0,003	25,696	2,188	2,467	0,119	28,025	2,258	2,552	-0,003	29,42
5.9	10	20,0	2,798	3,022	-0,826	22,327	3,120	3,349	0,217	22,962	3,245	3,462	0,300	21,82	
$\alpha = 0,020 \text{ rad}$															
5.1	5	200x200	5,0	0,503	1,874	1,441	68,454	0,587	1,966	1,982	68,996	0,620	2,000	2,282	69,02
5.2	5		10,0	1,003	2,109	1,513	55,290	1,080	2,225	2,149	57,314	1,110	2,272	2,402	58,12
5.3	10		5,0	1,090	2,055	1,343	48,254	1,270	2,265	1,632	49,824	1,298	2,288	1,685	49,42
5.4	10		10,0	1,868	2,613	1,463	37,418	1,983	2,754	1,587	38,627	2,045	2,809	1,556	38,12
5.5	20	200x100	5,0	3,113	3,618	1,638	25,254	3,293	3,803	1,660	25,506	3,308	3,822	1,531	25,72
5.6	20		10,0	4,678	5,172	2,110	24,708	4,943	5,445	2,391	25,196	5,130	5,599	2,740	23,52
5.7	10		5,0	1,113	1,953	1,427	42,093	1,288	2,161	1,609	43,781	1,345	2,222	1,586	43,92
5.8	10		10,0	1,845	2,603	1,054	37,993	2,010	2,881	1,183	43,505	2,080	2,984	1,094	45,12
5.9	10	20,0	2,695	3,460	1,010	38,213	2,990	3,747	1,645	37,858	3,108	3,870	1,758	38,02	
$\alpha = 0,030 \text{ rad}$															
5.1	5	200x200	5,0	-0,067	2,313	2,505	79,387	-0,020	2,355	3,018	79,100	-0,002	2,377	3,231	79,42
5.2	5		10,0	0,563	2,674	2,824	70,468	0,590	2,749	3,254	72,000	0,612	2,773	3,490	72,02
5.3	10		5,0	0,813	2,660	2,482	61,644	0,867	2,736	2,687	62,305	0,895	2,742	2,763	61,52
5.4	10		10,0	1,648	3,161	2,696	50,506	1,710	3,277	2,720	52,224	1,763	3,318	2,733	51,72
5.5	20	200x100	5,0	3,108	4,169	2,948	35,340	3,220	4,298	2,882	35,943	3,220	4,290	2,703	35,62
5.6	20		10,0	4,608	5,676	3,549	35,642	4,840	5,952	3,800	37,080	5,043	6,122	4,278	35,22
5.7	10		5,0	0,883	2,545	2,421	55,502	0,957	2,670	2,492	57,105	0,987	2,696	2,560	56,32
5.8	10		10,0	1,580	3,316	2,184	57,898	1,685	3,508	2,257	60,799	1,735	3,558	2,168	60,82
5.9	10	20,0	2,488	4,039	2,560	51,706	2,740	4,303	3,088	52,098	2,835	4,464	3,146	54,22	

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 19: Versuchsergebnisse Serie 5

Nr.	Elastomerlager (EPDM)			1. Verdrehungszyklus				2. Verdrehungszyklus				3. Verdrehungszyklus					
	Abmessungen		σ_a [N/mm ²]	$\alpha = 0,000 \text{ rad}$													
				f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e		
	t mm	a x b mm x mm															
6.1	5	200x200	5,0	0,380		0,170	33,326	1,105		1,050	29,673	1,125	1,129	1,955	29,655		
6.2	5		10,0	1,233		0,269	23,224	1,543		2,031	25,055	1,580		3,199	23,679		
6.3	10		5,0	1,123		0,025	4,114	1,708		1,146	8,542	1,790		1,592	10,767		
6.4	10		10,0	1,863		0,553	5,339	2,643		2,754	10,832	2,760		3,302	16,639		
6.5	20	200x100	5,0	2,648		0,242	-4,968	3,575		0,550	0,209	3,730		0,564	-0,123		
6.6	20		10,0	4,313		-0,313	0,687	4,830		-0,900	4,317	4,950		-0,761	3,349		
6.7	10		5,0	1,213		-0,389	5,829	1,735		-1,265	7,931	1,800		-1,632	0,183		
6.8	10		10,0	1,758		-0,460	2,663	2,335		-0,986	7,827	2,425		-1,093	8,273		
6.9	10	20,0	2,633		-0,346	1,599	3,303		-0,570	10,648	3,433		-0,616	10,332			
6.10	10	100x200	5,0	1,065		-0,461	-1,151	1,528		-1,003	0,456	1,608		-1,036	0,412		
6.11	10		10,0	1,785		-0,838	-0,080	2,113		-1,542	1,246	2,190		-1,579	1,592		
6.12	10		20,0	3,188		-2,157	-1,232	3,778		-4,325	-0,010	3,865		-4,807	0,627		
$\alpha = 0,010 \text{ rad}$																	
6.1	5	200x200	5,0	0,560	1,066	1,276	50,480	0,782	1,284	2,258	50,105	0,825	1,321	3,148	49,459		
6.2	5		10,0	1,030	1,465	1,476	43,450	1,313	1,784	3,270	47,126	1,365	1,823	4,423	45,667		
6.3	10		5,0	1,153	1,463	1,004	31,195	1,683	1,996	2,313	31,353	1,723	2,038	3,028	31,492		
6.4	10		10,0	1,950	2,226	2,004	27,519	2,628	2,935	4,259	30,846	2,730	3,039	4,795	30,919		
6.5	20	200x100	5,0	2,820	2,892	1,500	7,211	3,600	3,716	1,828	11,567	3,733	3,844	1,804	11,171		
6.6	20		10,0	4,368	4,507	0,674	14,041	4,798	4,943	0,657	14,586	4,915	5,057	0,672	14,232		
6.7	10		5,0	1,158	1,420	0,239	26,127	1,585	1,892	-0,400	30,655	1,660	1,958	-0,778	29,824		
6.8	10		10,0	1,790	2,040	0,273	25,030	2,213	2,483	0,145	27,122	2,300	2,574	0,035	27,416		
6.9	10	20,0	2,770	2,995	1,094	22,540	3,218	3,467	1,146	24,910	3,370	3,624	1,147	25,416			
6.10	10	100x200	5,0	1,140	1,197	0,054	5,725	1,523	1,597	-0,087	7,422	1,598	1,668	-0,101	7,047		
6.11	10		10,0	1,838	1,892	-0,225	5,460	2,088	2,156	-0,351	6,823	2,168	2,237	-0,361	6,967		
6.12	10		20,0	3,308	3,363	-1,555	5,596	3,730	3,813	-2,959	8,323	3,823	3,902	-3,379	7,977		
$\alpha = 0,020 \text{ rad}$																	
6.1	5	200x200	5,0	0,135	1,413	2,505	63,859	0,337	1,627	3,578	64,482	0,393	1,654	4,477	63,173		
6.2	5		10,0	0,695	1,800	3,060	55,268	0,903	2,150	4,641	62,312	0,985	2,210	5,779	61,425		
6.3	10		5,0	0,962	1,828	2,149	43,310	1,435	2,353	3,443	45,830	1,495	2,408	4,110	45,669		
6.4	10		10,0	1,938	2,741	3,872	40,233	2,433	3,325	5,706	44,680	2,538	3,438	6,232	45,084		
6.5	20	200x100	5,0	2,995	3,381	3,042	19,344	3,548	3,989	3,119	22,022	3,698	4,113	3,195	20,802		
6.6	20		10,0	4,355	4,826	2,214	23,625	4,683	5,182	2,170	24,959	4,795	5,284	2,205	24,447		
6.7	10		5,0	0,948	1,838	1,175	44,549	1,285	2,265	0,446	48,966	1,330	2,241	0,102	45,617		
6.8	10		10,0	1,610	2,471	1,459	43,103	1,938	2,837	1,263	44,957	2,038	2,920	1,221	44,072		
6.9	10	20,0	2,673	3,476	2,774	40,223	3,025	3,850	2,916	41,308	3,178	3,982	2,995	40,239			
6.10	10	100x200	5,0	1,190	1,446	0,979	12,777	1,498	1,755	0,846	12,911	1,563	1,822	0,834	12,947		
6.11	10		10,0	1,845	2,082	0,867	11,878	2,053	2,312	0,816	12,947	2,115	2,375	0,831	12,964		
6.12	10		20,0	3,293	3,544	-0,305	12,602	3,640	3,958	-1,441	15,932	3,730	4,056	-1,898	16,313		
$\alpha = 0,030 \text{ rad}$																	
6.1	5	200x200	5,0	-0,398	1,775	3,803	72,381	-0,222	1,972	4,804	73,042	-0,135	2,001	5,735	71,190		
6.2	5		10,0	0,237	2,330	4,625	69,719	0,383	2,624	6,075	74,719	0,465	2,682	7,185	73,917		
6.3	10		5,0	0,768	2,369	3,667	53,417	1,083	2,761	4,640	55,943	1,120	2,785	5,224	55,559		
6.4	10		10,0	1,773	3,424	5,973	55,029	2,095	3,839	7,128	58,076	2,178	3,933	7,641	58,591		
6.5	20	200x100	5,0	3,070	4,041	4,566	32,405	3,455	4,394	4,424	31,340	3,585	4,536	4,472	31,731		
6.6	20		10,0	4,285	5,306	3,699	34,094	4,535	5,576	3,687	34,723	4,623	5,687	3,670	35,479		
6.7	10		5,0	0,610	2,263	2,194	55,033	0,847	2,600	1,356	58,342	0,875	2,716	1,001	61,269		
6.8	10		10,0	1,290	2,956	2,759	55,573	1,563	3,255	2,503	56,382	1,650	3,331	2,468	56,036		
6.9	10	20,0	2,453	4,069	4,683	53,836	2,698	4,364	4,710	55,567	2,833	4,503	4,800	55,645			
6.10	10	100x200	5,0	1,188	1,768	1,908	19,338	1,430	1,975	1,858	18,156	1,493	2,044	1,757	18,401		
6.11	10		10,0	1,803	2,340	1,967	17,922	1,970	2,520	1,993	18,330	2,038	2,596	1,979	18,645		
6.12	10		20,0	3,225	3,823	1,119	19,892	3,490	4,191	0,147	23,375	3,575	4,268	-0,185	23,120		
$\alpha = -0,030 \text{ rad}$																	
6.1	5	200x200	5,0	0,190	2,838	-1,598	-88,241	0,160	3,055	-0,637	-96,569	0,033	3,675	0,407	-121,675		
6.2	5		10,0	0,495	2,776	-1,450	-76,031	0,470	2,868	-0,873	-79,925	0,435	2,903	-0,791	-82,225		
6.3	10		5,0	0,818	3,043	-1,565	-74,162	0,908	3,147	-0,862	-74,684	0,953	3,168	-0,377	-73,898		
6.4	10		10,0	1,940	3,519	-1,081	-52,611	2,065	3,622	-0,531	-51,836	2,110	3,705	-0,063	-53,105		
6.5	20	200x100	5,0	3,125	4,391	-2,715	-42,216	3,303	4,578	-2,758	-42,497	3,375	4,660	-2,763	-42,810		
6.6	20		10,0	4,420	5,408	-4,641	-32,900	4,553	5,535	-4,725	-32,771	4,613	5,614	-4,743	-33,355		
6.7	10		5,0	0,870	2,879	-4,195	-66,934	0,940	2,805	-4,573	-62,155	0,993	3,069	-4,626	-69,128		
6.8	10		10,0	1,565	3,324	-3,501	-58,701	1,638	3,419	-3,619	-59,307	1,693	3,477	-3,610	-59,482		
6.9	10	20,0	2,458	4,218	-3,283	-58,665	2,633	4,435	-3,419	-60,146	2,703	4,477	-3,423	-59,099			
6.10	10	100x200	5,0	1,275	1,947	-3,437	-22,404	1,350	2,047	-3,508	-23,214	1,383	2,089	-3,357	-23,575		
6.11	10		10,0	1,903	2,488	-4,466	-19,513	1,988	2,564	-4,562	-19,231	2,040	2,630	-4,581	-19,636		
6.12	10		20,0	3,430	4,232	-7,081	-26,703	3,570	4,441	-7,728	-29,021	3,653	4,510	-8,308	-28,576		

Alle Angaben in N/mm², mm und rad

Tabelle A 20: Versuchsergebnisse Serie 6

Nr.	Elastomer- lager (EPDM)		Ver- dre- hung α	vertikale Belastung												
	Abmessungen			$\sigma_m = 2,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_m = 4,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_m = 5,0 \text{ N/mm}^2$				
	t mm	a x b mm x mm		rad	f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e
7.1 7.2	10 10	200x200	0,015= const.	-7,595 -7,578	-6,690 -6,714	2,116 2,400	60,278 57,571	-7,515 -7,548	-6,655 -6,758	2,531 3,424	57,551 52,794	-7,528 -	-6,686 -	2,791 -	56,220 -	
7.3 7.4	20 20			-7,593 -7,598	-7,003 -6,992	2,845 2,841	39,251 40,304	-7,488 -7,558	-6,932 -7,026	3,643 4,084	36,953 35,564	-7,553 -	-7,030 -	4,039 -	34,937 -	
7.5 7.6 7.7	10 10 10	100x200		-7,630 -7,558 -	-7,322 -7,277 -	1,956 1,949 -	20,477 18,772 -	-7,655 -7,488 -7,483	-7,391 -7,233 -7,235	2,259 2,427 2,880	17,624 16,983 16,459	-7,703 - -	-7,442 - -	2,396 - -	17,358 - -	
				$\sigma_m = 6,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_m = 8,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_m = 10,0 \text{ N/mm}^2$				
7.1 7.2	10 10	200x200		0,015= const.	- -7,500	- -6,728	- 4,098	- 51,373	- -7,515	- -6,761	- 4,795	- 50,325	- -7,555	- -6,809	- 5,530	- 49,678
7.3 7.4	20 20				- -7,635	- -7,132	- 5,327	- 33,573	- -7,585	- -7,096	- 6,226	- 32,540	- -7,633	- -7,149	- 6,719	- 32,130
7.5 7.6 7.7	10 10 10	100x200			- -7,600 -	- -7,369 -	- 2,996 -	- 15,475 -	- -7,608 -7,565	- -7,379 -7,348	- 3,468 3,811	- 15,229 14,417	- -7,580 -	- -7,364 -	- 3,862 -	- 14,426 -
					$\sigma_m = 12,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_m = 16,0 \text{ N/mm}^2$				$\sigma_m = 20,0 \text{ N/mm}^2$			
7.7	10	100x200	0,015= const.		-7,525	-7,333	4,621	12,820	-7,570	-7,385	5,202	12,347	-7,510	-7,332	5,781	11,907

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 21 : Versuchsergebnisse Serie 7

Nr.	a x b x d	T	n	f _{zen}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e	f _{zen}	f _{exz}	w	e
$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$																		
				$\alpha = 0,000 \text{ rad}$			$\alpha = 0,010 \text{ rad}$			$\alpha = 0,020 \text{ rad}$			$\alpha = 0,030 \text{ rad}$					
8.5	200x150x14	10	1	0,893	-0,089	-27,077	0,838	1,372	0,776	53,343	0,388	1,673	1,977	64,380	-0,153	1,963	3,233	70,496
8.7	150x200x35	25	4	1,008	0,095	-0,884	1,058	1,237	1,592	17,955	1,008	1,627	3,263	30,991	0,878	2,010	5,002	37,771
8.12	200x150x35	25	4	0,925	0,090	0,335	0,938	1,315	1,550	37,726	0,690	1,723	3,218	51,612	0,330	2,109	4,882	59,306
8.18	200x150x56	40	7	1,058	0,381	3,824	1,125	1,424	1,984	30,034	1,005	1,868	3,988	43,170	0,793	2,333	5,997	51,348
8.27	Ø 200x52	37	4	1,545	-0,737	-3,333	1,645	1,743	0,824	9,803	1,675	2,135	2,683	22,982	1,715	2,713	4,792	33,300
$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$																		
8.1	100x150x35	25	4	2,153	-3,120	-1,656	2,205	2,233	-2,092	2,749	2,238	2,383	-0,161	7,282	2,218	2,588	1,804	12,371
8.3	150x100x35	25	4	1,855	-1,264	-7,410	1,980	2,011	-0,012	3,115	2,028	2,296	1,839	13,430	2,038	2,712	4,110	22,483
8.4	150x200x14	10	1	1,218	-0,131	-14,747	1,288	1,446	0,845	15,830	1,193	1,899	2,216	35,409	0,935	2,253	3,687	43,958
8.6	200x150x14	10	1	1,195	0,096	-21,835	1,255	1,650	1,198	39,448	0,918	2,071	2,791	57,588	0,457	2,396	4,306	64,531
8.8	150x200x35	25	4	1,428	0,055	-0,810	1,480	1,586	1,907	10,645	1,483	1,906	4,165	21,144	1,428	2,319	6,590	29,704
8.13	200x150x35	25	4	1,448	0,517	0,389	1,515	1,763	2,871	24,723	1,400	2,292	5,313	44,599	1,185	2,818	8,043	54,381
8.17	150x200x56	40	7	1,720	2,004	-1,805	1,790	1,873	4,908	8,268	1,920	2,268	8,235	17,405	1,973	2,753	11,518	25,994
8.19	200x150x56	40	7	1,798	0,246	1,481	1,850	2,030	2,252	18,072	1,845	2,508	4,865	33,165	1,755	3,135	7,842	46,024
8.21	200x250x52	37	4	2,295	-3,923	-6,363	2,373	2,446	-2,085	7,347	2,370	2,776	0,466	20,258	2,345	3,300	3,302	31,854
8.23	250x200x52	37	4	2,303	-2,055	-5,594	2,413	2,590	-0,037	17,689	2,380	3,173	2,559	39,683	2,208	3,822	5,575	53,775
8.25	250x300x52	37	4	2,248	-1,781	5,658	2,318	2,598	0,369	28,089	2,103	3,004	3,034	45,011	1,893	3,589	5,979	56,492
8.26	300x250x52	37	4	2,175	-0,709	7,518	2,213	2,598	1,593	38,475	2,000	3,173	4,369	58,709	1,655	3,824	7,182	72,361
8.28	Ø 200x52	37	4	2,378	-1,119	-4,880	2,515	2,573	1,085	5,753	2,540	2,846	3,816	15,260	2,535	3,279	6,527	24,813
8.32	Ø 250x52	37	4	2,043	-2,885	-0,718	2,133	2,323	-0,874	18,979	2,138	2,843	1,723	35,230	2,023	3,420	4,469	46,636
$\sigma_m = 15 \text{ N/mm}^2$																		
8.9	150x200x35	25	4	2,058	-0,057	1,089	2,123	2,231	2,489	10,761	2,100	2,510	5,086	20,576	2,118	2,964	8,259	28,253
8.14	200x150x35	25	4	1,888	1,152	-2,125	1,963	2,147	4,116	18,557	1,925	2,676	7,085	37,568	1,760	3,268	9,962	50,297
8.22	200x250x52	37	4	3,085	-0,385	-1,709	3,180	3,280	2,088	10,006	3,218	3,630	4,990	20,602	3,185	4,091	8,201	30,174
8.24	250x200x52	37	4	3,075	-3,393	-4,288	3,125	3,266	-1,180	14,075	3,168	3,807	1,604	32,031	3,015	4,396	4,496	45,993
8.29	Ø 200x52	37	4	3,063	2,134	-0,769	3,185	3,278	5,399	9,264	3,250	3,626	8,787	18,814	3,298	4,064	12,406	25,571
8.33	Ø 250x52	37	4	2,785	-3,450	-1,755	2,940	3,088	-1,369	14,805	2,848	3,420	1,494	28,670	2,860	4,117	4,331	41,995
$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$																		
8.2	100x150x35	25	4	2,860	4,804	-1,708	3,050	3,082	7,722	3,248	3,195	3,354	10,801	7,928	3,295	3,665	13,449	12,353
8.10	150x200x35	25	4	3,040	-0,735	-6,005	3,138	3,177	1,580	3,960	3,163	3,431	4,402	13,438	3,233	3,868	7,730	21,172
8.15	200x150x35	25	4	2,545	-2,358	-3,588	2,588	2,747	0,152	15,924	2,568	3,195	3,491	31,335	2,445	3,737	6,683	43,058
8.30	Ø 200x52	37	4	3,875	1,503	-0,828	3,990	4,080	4,976	8,950	4,060	4,402	9,041	17,134	4,088	4,842	12,943	25,138
$\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$																		
8.11	150x200x35	25	4	3,108	-6,094	-5,494	3,165	3,194	-3,843	2,938	3,175	3,385	-0,628	10,517	3,163	3,715	2,487	18,448
8.16	200x150x35	25	4	3,113	-3,090	-2,806	3,160	3,306	-0,183	14,671	3,140	3,686	3,796	27,285	3,073	4,284	7,775	40,417
8.31	Ø 200x52	37	4	4,700	-3,417	-7,058	4,755	4,775	-0,798	2,046	4,823	5,019	3,756	9,826	4,930	5,446	8,139	17,161

Alle Angaben in N/mm^2 , mm und rad

Tabelle A 22:

Versuchsergebnisse Serie 8

a	b	x	d	T	n	V	σ_m	H	α	f_{zen}	w	e	H	α	w	e	H	α	w	e
mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN	N/mm ²	1. Aufbringen der Horizontallast					2. Verdrehung unter H = const., V = const.				3. Verdrehung unter erhöhter H-Last			
150x200x35	25	4	150	5,0			7,0 14,0 21,0	0,000		1,408 1,353 1,230	4,469 10,442 16,843	0,743 5,685 10,207	21,0	0,005 0,010 0,020 0,030	18,323 19,525 21,453 23,878	22,715 31,494 45,378 52,133				
150x200x35	25	4	300	10,0			7,0 14,0 21,0	0,000		1,623 1,535 1,400	4,893 11,045 16,617	-0,697 3,129 6,914	21,0	0,005 0,010 0,020 0,030	18,560 19,365 21,404 23,474	14,209 21,609 31,734 40,830	42,0	0,005 0,010 0,020 0,030	35,184 36,047 38,307 39,792	27,521 34,743 42,100 50,651
150x200x35	25	4	450	15,0			7,0 14,0 21,0	0,000		2,165 2,110 1,893	3,541 9,566 15,888	-3,673 -0,295 3,688	21,0	0,005 0,010 0,020 0,030	17,733 19,057 21,377 23,752	10,497 13,838 24,933 33,497	42,0	0,005 0,010 0,020 0,030	31,523 33,089 34,233 35,266	13,926 20,788 26,430 30,064
200x150x35	25	4	150	5,0			7,0 14,0 21,0	0,000		1,108 1,023 0,855	4,823 11,251 17,913	-2,238 2,808 8,102	21,0	0,005 0,010 0,020 0,030	19,266 20,624 23,746 26,392	31,955 50,952 68,449 74,075				
200x150x35	25	4	300	10,0			7,0 14,0 21,0	0,000		1,718 1,650 1,510	5,167 11,407 17,541	-3,575 0,988 5,600	21,0	0,005 0,010 0,020 0,030	19,029 20,014 22,244 24,913	21,882 34,621 55,222 66,823	42,0	0,005 0,010 0,020 0,030	35,875 36,732 38,872 41,218	34,572 49,121 66,992 76,739
200x150x35	25	4	450	15,0			7,0 14,0 21,0	0,000		2,215 2,225 2,010	4,393 10,631 17,664	-5,042 -1,441 3,161	21,0	0,005 0,010 0,020 0,030	19,145 20,569 22,601 25,066	16,470 25,700 45,614 59,860	42,0	0,005 0,010 0,020 0,030	34,363 35,444 37,583 39,566	28,343 39,189 57,234 69,074
200x250x52	37	4	500	10,0			7,0 14,0 21,0 28,0 35,0	0,000		2,488 2,455 2,368 2,235 2,058	4,899 10,265 16,011 21,638 27,329	1,448 3,844 6,982 10,005 13,435	35,0	0,005 0,010 0,020 0,030	28,829 30,367 33,235 36,255	21,739 28,066 40,260 49,940	70,0	0,005 0,010 0,020 0,030	52,861 54,064 56,343 58,880	36,246 44,112 50,997 60,547
200x250x52	37	4	750	15,0			7,0 14,0 21,0 28,0 35,0	0,000		2,885 2,870 2,785 2,630 2,455	0,241 4,670 9,451 13,859 19,574	-5,591 -2,190 1,341 4,954 9,288	35,0	0,005 0,010 0,020 0,030	21,480 22,745 25,799 28,334	15,953 21,525 31,872 42,271	70,0	0,005 0,010 0,020 0,030	42,736 44,410 46,994 49,916	31,669 36,897 48,584 56,059
Ø 200x52	37	4	157	5,0			7,0 14,0 22,0	0,000		1,410 1,285 0,993	7,633 16,466 27,780	2,765 9,074 17,554	22,0	0,005 0,010 0,020 0,030	29,237 30,628 32,928 35,443	26,819 33,656 45,247 54,002				
Ø 200x52	37	4	314	10,0			7,0 14,0 22,0	0,000		2,413 2,278 2,018	5,948 14,540 24,094	0,730 6,850 12,937	22,0	0,005 0,010 0,020 0,030	26,104 27,439 30,112 32,610	20,106 26,310 32,892 44,729	44,0	0,005 0,010 0,020 0,030	50,162 51,246 53,920 56,420	37,921 44,418 52,274 57,923
Ø 200x52	37	4	471	15,0			7,0 14,0 22,0	0,000		3,060 2,965 2,718	3,458 11,536 20,953	-2,840 2,350 9,851	22,0	0,005 0,010 0,020 0,030	22,948 24,582 27,553 30,510	15,571 19,927 29,509 35,184	44,0	0,005 0,010 0,020 0,030	43,968 45,710 48,239 50,965	31,133 36,296 44,786 48,872

Alle Angaben in N/mm², mm und rad

Tabelle A 23 : Versuchsergebnisse Serie 9

Nr. *	α rad	σ_m N/mm ²	Verfor- mungen mm	Zeit nach dem Aufbringen der Belastung und der Verdrehung in min								
				0 : 00	~ 1 : 30	~ 3 : 00	~ 5 : 00	~ 12 : 00	~ 24 : 00	~ 48 : 00	~ 96 : 00	~ 192 : 00
10.1	0,030	5,0	f_{zen}	0,753	0,758	0,758	0,763	0,773	0,783	0,790	0,798	0,808
			f_{exz}	1,686	1,685	1,685	1,685	1,694	1,698	1,699	1,707	1,709
			e	31,095	30,899	30,924	30,741	30,721	30,518	30,295	30,329	30,096
10.2	0,030	10,0	f_{zen}	1,913	1,920	1,923	1,930	1,935	1,950	1,955	1,960	1,973
			f_{exz}	2,736	2,729	2,725	2,726	2,720	2,729	2,728	2,721	2,726
			e	27,420	26,966	26,738	26,521	26,150	25,956	25,736	25,362	25,127
10.3	0,030	15,0	f_{zen}	2,423	2,423	2,423	2,433	2,430	2,440	2,448	2,463	2,478
			f_{exz}	3,019	3,017	3,014	3,022	3,020	3,024	3,027	3,037	3,044
			e	19,883	19,799	19,723	19,638	19,650	19,450	19,322	19,156	18,880
10.4 **	0,030	10,0	f_{zen}	1,728	1,733	1,738	1,745	1,755	1,770	1,788	1,803	1,815
			f_{exz}	2,533	2,535	2,537	2,542	2,548	2,561	2,570	2,579	2,583
			e	26,834	26,725	26,643	26,542	26,416	26,326	26,065	25,882	25,624
10.5 **	0,030	15,0	f_{zen}	2,290	2,295	2,305	2,308	2,315	2,328	2,343	2,358	2,378
			f_{exz}	2,931	2,929	2,935	2,934	2,935	2,942	2,954	2,965	2,984
			e	21,365	21,125	21,006	20,871	20,674	20,509	20,402	20,286	20,124

Alle Angaben in N/mm², mm und rad

*Bei allen Versuchen wurden Elastomerlager mit den Abmessungen a x b x d = 150 x 200 x 35 mm,
T = 25, n = 4, untersucht.

**Bei den Versuchen 10.4 und 10.5 wurde sowohl die Belastung wie auch die Verdrehung in je einem Schritt aufgebracht.

Tabelle A 24: Versuchsergebnisse Serie 10

Nr.	Elastomerlager (CR)		σ_m N/mm ²	1. Verdrehungszyklus				2. Verdrehungszyklus				3. Verdrehungszyklus			
	Abmessungen			$\alpha = 0,000 \text{ rad}$											
	a x b x d mm	T mm		f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e	f_{zen}	f_{exz}	w	e
10.1	150x200x35	25	5,0	1,180		-0,089	-12,596	1,395		-0,475	-8,293	1,425		-0,430	-8,732
10.2			10,0	1,610		-0,298	-4,695	1,788		-1,110	-2,790	1,798		-1,093	-2,894
10.3			15,0	2,220		-0,211	-9,465	2,393		-1,270	-6,907	2,425		-1,312	-6,617
10.4	200x150x35	25	5,0	1,175		-0,172	-18,562	1,293		-0,118	-10,878	1,303		0,177	-9,603
10.5			10,0	1,505		-0,144	-2,462	-1,625		-1,206	-0,846	1,630		-1,223	-0,854
10.6			15,0	2,215		0,445	-8,454	2,418		-0,401	-3,426	2,428		-0,656	-1,308
10.7	200x250x52	37	10,0	2,263		-0,094	-0,981	2,483		-0,497	0,893	2,515		-0,356	0,741
10.8	Ø 200x52	37	10,0	2,460		1,805	-1,003	2,728		1,985	0,816	2,765		1,923	1,337
10.9			15,0	3,128		0,496	-1,318	3,365		-0,097	1,000	3,413		0,047	0,506
$\alpha = 0,010 \text{ rad}$															
11.1	150x200x35	25	5,0	1,278	1,347	0,919	6,951	1,418	1,496	0,959	7,804	1,458	1,525	0,961	6,799
11.2			10,0	1,673	1,743	1,268	7,081	1,800	1,870	1,006	7,065	1,810	1,884	0,975	7,440
11.3			15,0	2,335	2,344	1,929	0,950	2,450	2,472	1,678	2,189	2,473	2,496	1,634	2,371
11.4	200x150x35	25	5,0	1,233	1,498	0,982	26,603	1,305	1,547	1,389	24,324	1,323	1,583	1,679	25,905
11.5			10,0	1,560	1,640	0,970	8,003	1,640	1,729	0,750	8,876	1,635	1,715	0,751	8,033
11.6			15,0	2,300	2,423	2,268	12,331	2,425	2,559	2,157	13,433	2,445	2,585	2,053	13,996
11.7	200x250x52	37	10,0	2,350	2,471	2,350	12,129	2,503	2,623	2,465	12,018	2,538	2,650	2,770	11,309
11.8	Ø 200x52	37	10,0	2,595	2,680	4,594	8,554	2,775	2,874	4,849	9,883	2,808	2,903	4,914	9,573
11.9			15,0	3,220	3,303	3,429	8,362	3,385	3,478	3,615	9,261	3,435	3,523	3,798	8,820
$\alpha = 0,020 \text{ rad}$															
11.1	150x200x35	25	5,0	1,323	1,819	2,275	24,856	1,448	1,940	2,411	24,577	1,475	1,964	2,362	24,473
11.2			10,0	1,658	2,046	2,923	19,435	1,778	2,151	3,044	18,706	1,793	2,161	3,059	18,452
11.3			15,0	2,378	2,589	4,811	10,573	2,460	2,682	4,583	11,070	2,485	2,710	4,632	11,271
11.4	200x150x35	25	5,0	1,100	2,118	2,418	50,865	1,193	2,199	2,924	50,400	1,205	2,204	3,224	49,990
11.5			10,0	1,555	1,956	2,720	20,052	1,605	2,013	2,641	20,365	1,600	1,999	2,622	19,951
11.6			15,0	2,263	2,882	4,569	30,924	2,345	2,970	4,522	31,262	2,208	3,564	6,689	45,143
11.7	200x250x52	37	10,0	2,375	2,851	5,210	23,795	2,480	2,958	5,329	23,860	2,448	3,505	8,336	35,227
11.8	Ø 200x52	37	10,0	2,655	3,005	7,610	17,520	2,775	3,134	7,866	18,016	2,803	3,187	7,697	19,240
11.9			15,0	3,230	3,576	6,848	17,276	3,368	3,726	7,110	17,924	3,413	3,761	7,380	17,417
$\alpha = 0,030 \text{ rad}$															
11.1	150x200x35	25	5,0	1,250	2,319	3,816	35,579	1,353	2,409	3,859	35,183	1,378	2,439	3,875	35,407
11.2			10,0	1,645	2,512	5,167	28,901	1,720	2,605	5,067	29,546	1,735	2,618	5,055	29,434
11.3			15,0	2,378	2,968	7,582	19,690	2,443	3,069	7,169	20,896	2,468	3,060	7,475	19,753
11.4	200x150x35	25	5,0	0,800	2,613	4,194	60,501	0,850	2,667	4,554	60,635	0,875	2,699	4,809	60,890
11.5			10,0	1,520	2,415	4,709	29,877	1,530	2,468	4,473	31,250	1,533	2,461	4,479	30,980
11.6			15,0	2,138	3,501	6,950	45,445	2,175	3,517	6,835	44,764	2,208	3,564	6,689	45,143
11.7	200x250x52	37	10,0	2,350	3,417	8,141	35,530	2,415	3,465	8,097	35,033	2,448	3,505	8,336	35,227
11.8	Ø 200x52	37	10,0	2,660	3,470	10,516	26,961	2,735	3,562	10,631	27,541	2,765	3,584	10,718	27,279
11.9			15,0	3,238	3,982	10,392	24,808	3,318	4,076	10,587	25,309	3,350	4,120	10,650	25,683
$\alpha = -0,030 \text{ rad}$															
11.1	150x200x35	25	5,0	0,800	2,129	-4,191	-44,362	0,860	2,154	-4,294	-43,192	0,867	2,171	-4,210	-43,445
11.2			10,0	1,463	2,548	-6,286	-36,232	1,485	2,582	-6,294	-36,590	1,518	2,589	-6,385	-35,705
11.3			15,0	2,015	3,117	-8,281	-36,720	2,070	3,162	-8,408	-36,362	2,073	3,167	-8,446	-36,467
11.4	200x150x35	25	5,0	0,245	2,116	-3,797	-62,444	0,285	2,133	-3,571	-61,566	0,315	2,141	-3,296	-60,952
11.5			10,0	1,338	2,421	-5,778	-36,108	1,360	2,445	-5,688	-36,164	1,363	2,454	-5,675	-36,374
11.6			15,0	1,708	3,359	-6,723	-55,009	1,745	3,383	-6,808	-54,605	1,790	3,421	-6,832	-54,426
11.7	200x250x52	37	10,0	2,328	3,440	-8,294	-37,126	2,365	3,483	-8,360	-37,263	2,383	3,499	-8,300	-37,212
11.8	Ø 200x52	37	10,0	2,408	3,223	-5,286	-27,212	2,458	3,278	-5,282	-27,338	2,478	3,298	-5,197	-27,368
11.9			15,0	3,098	3,884	-9,186	-26,181	3,153	3,929	-9,201	-25,929	3,180	3,957	-9,228	-25,897

Alle Angaben in N/mm², mm und rad

Tabelle A 25 : Versuchsergebnisse Serie 11

Braunschweig, 15. Juni 1983

- Ko/Ost/Wü -

K U R Z B E R I C H T

ZUM FORSCHUNGSVORHABEN

"AUFLAGERAUSBILDUNG BEI FERTIGTEILEN"

Tragverhalten von Auflagern im Stahlbetonfertigteilbau bei Ver-
drehung und Verschiebung der aufliegenden Fertigteile, Fortsetzung)

Auftraggeber: Der Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen
und Städtebau, 5300 Bonn - Bad Godesberg
(Az: BI5-80 O1 80-22)

Ausführende Stelle: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brand-
schutz der Technischen Universität Braunschweig

Berichterstatter: Kordina, K., und Osteroth, H.-H.

Abgeschlossen: Juni 1983

1. Problemstellung und Zielsetzung

Die im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens durchgeführten Versuche stellen eine Fortsetzung des im Jahre 1979 abgeschlossenen Forschungsvorhabens gleichen Titels /1/ dar und sollen zur Verbesserung der Konstruktionspraxis von Auflagerungen der Stahlbetonfertigteile unter Verwendung von Elastomerlagern beitragen, indem auf experimentellem Wege Lösungen zur Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens dieser Lager erarbeitet und daraus Vorschläge für die baupraktische Anwendung unterbreitet werden.

Die Versuche wurden an bewehrten und an unbewehrten Elastomerlagern durchgeführt. Dabei sollten die Versuche mit unbewehrten Elastomerlagern vor allem zu einer Überprüfung und Erweiterung der in /1/ mitgeteilten Bemessungsvorschläge im Hinblick auf folgende Einflüsse und Parameter beitragen:

- Einfluß hoher Pressungen
- Einfluß der Rauigkeit der angrenzenden Bauteiloberflächen
- Einfluß zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung
- Langzeitverhalten
- Einfluß von Mehrfachverdrehungen und -belastungen
- Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchungen

Mit den Versuchen an bewehrten Elastomerlagern sollten für im Hoch- und Industriebau übliche Abmessungen dieses Lagertyps Last-Stauchungs- und Verdrehungs-Exzentrizitäts-Beziehungen erarbeitet werden. Dabei wurden ebenso wie bei den Versuchen an unbewehrten Elastomerlagern folgende Parameter untersucht:

- Einfluß zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung
- Langzeitverhalten
- Einfluß von Mehrfachverdrehungen
- Einfluß der Reihenfolge der Beanspruchungen

Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Oberflächenrauigkeiten wurden an bewehrten Lagern nicht durchgeführt, da sie lediglich für Aussagen zur Gleitsicherheit von Auflagerungen mit bewehrten Elastomerlagern interessieren und hierzu bereits ausreichende Kenntnisse vorliegen /10/.

2. Durchführung der Versuche

Die bereits für die Versuchsdurchführung zu /1/ entwickelte Versuchseinrichtung wurde in ihrer Grundkonzeption auch für die hier durchgeführten Versuche übernommen und lediglich in einigen Punkten geändert bzw. weiterentwickelt.

Es wurden insgesamt 118 Versuche an unbewehrten und 64 Versuche an bewehrten Elastomerlagern durchgeführt. Die unbewehrten Elastomerlager hatten eine Dicke $t = 5$ mm bis 20 mm sowie Kantenlängen a bzw. b von 100 mm bis 200 mm. Die bewehrten Lager hatten Elastomerdicken von $T = 10$ mm bis 40 mm bei Schichtanzahlen von $n = 1$ bis 7; die Grundrißflächen waren sowohl rund ($\varnothing 200$ mm und $\varnothing 250$ mm) wie auch rechteckig (Kantenlängen a bzw. $b = 100$ mm bis 200 mm). Für die Untersuchungen an unbewehrten Elastomerlagern wurden ausnahmslos EPDM-Lager in zulassungsgemäßer Qualität verwendet. Für die Untersuchungen an bewehrten Elastomerlagern wurden dagegen ausschließlich CR-Lager verwendet, da EPDM wegen der schlechten Vulkanisierbarkeit für diesen Lagertyp ungeeignet ist.

Bis auf die Versuche an unbewehrten Elastomerlagern, die den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit der angrenzenden Bauteile aufzeigen sollten, wurden bei allen Versuchen durch Handabzug mittels einer Stahlschiene hergestellte Betonauflagerplatten verwendet. Hierdurch sollte einerseits die Übereinstimmung mit den zu /1/ durchgeführten Versuchen gewährleistet bleiben, andererseits wurde hierdurch auch die Reproduzierbarkeit von im baupraktischen Sinne dieser Arbeit gleichen Betonoberflächen angestrebt, um Streuungen der Versuchsergebnisse infolge unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheiten zu verringern.

Entsprechend der unterschiedlichen Zielsetzungen der Versuche wurde die Höhe, die Kombination und die Reihenfolge der Beanspruchungen aus Vertikallast V , Horizontalkraft H und Winkelverdrehung α variiert.

3. Vorschläge zur wirklichkeitsnahen Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens und zur Konstruktionspraxis unbewehrter, lose verlegter Elastomerlager

3.1 Lagerstauchungen infolge Vertikalbelastung

Die unter zentrischer Beanspruchung in der Lagerachse gemessenen Stauchungen wurden den theoretischen Werten, die sich nach verschiedenen Berechnungsvorschlägen ergaben, gegenübergestellt. Dabei ergab - wie bereits in /1/ - der Ansatz aus /4/ die beste Übereinstimmung. Er kann aufgrund der hier durchgeführten Versuche wie folgt erweitert werden:

$$f = t \cdot \frac{\sigma_m}{10 \cdot G \cdot S + 2 \cdot \sigma_m} \cdot \frac{1}{k_e} \cdot k_T \cdot k_z \cdot k_M + \Delta t_0$$

Hierin sind:

f = Dickenänderung des Lagers

t = Lagerdicke im unverformten Zustand

σ_m = mittlere Lagerpressung ($\sigma_m = v/a \cdot b$)

G = Schubmodul

S = Formfaktor des Lagers = $\frac{\text{gedrückte Fläche}}{\text{freie Oberfläche}} = \frac{a \cdot b}{2 \cdot t \cdot (a + b)}$

Der Beiwert Δt_0 soll unvermeidbare Streuungen berücksichtigen und wird mit $\Delta t_0 = 0,05 \cdot t < 0,5 \text{ mm}$ angegeben.

Die Faktoren k_T , k_z , k_e und k_M berücksichtigen die Langzeitwirkung, den Temperatureinfluß, die Oberflächenbeschaffenheit und eventuelle Belastungswechsel. Dabei ist, wie die durchgeführten Versuche gezeigt haben, der Oberflächenbeschaffenheit der angrenzenden Bauteile eine entscheidende Bedeutung für die Größe der Lagerstauchung beizumessen.

Auch die Stauchungen unter erhöhten Pressungen bis $\sigma_m = 30 \text{ N/mm}^2$ stimmen mit den nach diesem Berechnungsvorschlag ermittelten Werten gut überein.

3.2 Exzentrizität e der Vertikallast bei Winkelverdrehungen

Die in den Versuchen gemessenen Exzentrizitäten wurden mit folgendem bereits in /1/ und /8/ mitgeteilten Ansatz verglichen:

$$e = \frac{a^2}{2 \cdot t} \cdot \left(\frac{1}{150} + \alpha \right) + w$$

mit e = Exzentrizität der Vertikallast V

a = Kantenlänge des Lagers

t = Dicke des Lagers

σ_m = mittlere Pressung in N/mm²

w = horizontale Verschiebung

α = planmäßiger Verdrehungswinkel

In diesem Ansatz kann die Exzentrizität bei $\alpha = 0$ als Folge eines ungewollten Verdrehungswinkels $\alpha_u = 1/150 = 0,0067$ rad gedeutet werden.

Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den nach obigem Ansatz ermittelten Werten. Die Berücksichtigung des in /1/ für den ersten Summanden angegebenen Faktors $4\sqrt{5,0/\sigma_m}$ führte bei den hier untersuchten hohen Pressungen zu einer Erhöhung der Abweichung der Versuchsergebnisse von den rechnerischen Werten. Er sollte deshalb unberücksichtigt bleiben.

Langzeiteinwirkungen, Mehrfachbelastungen und -verdrehungen haben nur geringen Einfluß auf die Größe der Exzentrizität e und können daher im Rahmen der bauüblichen Toleranzen vernachlässigt werden.

3.3 Horizontalverschiebung w und aufnehmbare Horizontalkraft H

Horizontalverschiebungen w ergeben sich aus Schiefstellungen der Vertikalbelastung infolge Winkelverdrehung und aus Horizontalkräften. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, daß infolge ungewollter Verdrehungswinkel bereits unter rein

zentrischen Vertikallasten Horizontalverschiebungen entstehen, die mit steigender Pressung und Lagerdicke Werte zwischen 20 % und 35 % der Lagerdicke erreichen können. Die Verschiebungen unter vertikaler Belastung und gleichzeitiger Verdrehung der angrenzenden Bauteile erreichten insbesondere unter hohen Pressungen Größenordnungen, die nur durch Gleitbewegungen in den Kontaktflächen ermöglicht werden und die nicht mehr ausschließlich durch elastische Verformungen der Lager aufgenommen werden können.

Die durchgeführten Versuche zeigen darüber hinaus, daß Winkelverdrehungen - trotz Erhöhung der Reibung in dem stärker beanspruchten Lagerbereich -, auf die gesamte Lagerfläche bezogen, zu einer Verringerung des Bewegungswiderstandes führen. Dies ist auf die teilweise Aufhebung des Formschlusses des in die Oberflächenporen der Kontaktfläche gepreßten Elastomers zurückzuführen.

Bei den Versuchen mit zusätzlicher Horizontalkraftbeanspruchung traten bei den $t = 5$ mm dicken Lagern bereits bei ca. $H = 0,07$ V Gleitbewegungen auf. Bei den dickeren Lagern ($t = 10$ mm, $t = 20$ mm) erhöhte sich dieser Wert bis auf ca. $H = 0,12 - 0,15$ V unter $\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$.

4. Vorschläge zur wirklichkeitsnahen Erfassung des Trag- und Verformungsverhaltens und zur Konstruktionspraxis bewehrter, lose verlegter Elastomerlager

4.1 Lagerstauchungen infolge Vertikalbelastung

Für die Stauchungsermittlung in der Lagerachse bei zentrischer Beanspruchung und bei exzentrischer Beanspruchung bis zum Auftreten einer Klaffung zwischen Lager und Bauteil wird folgender von Topaloff /11/ abgeleiteter Berechnungsvorschlag empfohlen, der trotz einiger idealisierender Annahmen (s. Abschn. 4.4.3.1) in /2/ eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen aufweist:

$$f = A + T \cdot \frac{G}{E_{1,v}}$$

Hierin sind:

- T = gesamte Elastomerdicke
 f = Dickenänderung des Lagers
 A = Anpassungssetzung, die zum Beispiel nach Bild 4.199 in /2/ ermittelt werden kann
 $E_{i,v}$ = ideeller Elastizitätsmodul, der sich nach Topaloff wie folgt ergibt:

$$E_{i,v} = E \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_v} \text{ mit } E = 3 \text{ G und}$$

b/a	0,5	1,0	2,0	∞
η_v	17,5	7,1	4,4	3,0

- a = Kantenlänge in Längsrichtung
 b = Kantenlänge in Querrichtung
 t = Elastomerdicke je Schicht

Die durchgeführten Versuche bestätigen, daß Mehrfachverdrehungen bei bewehrten Lagern nur zu einer sehr geringen Stauchungszunahme führen und daß zeitabhängige Verformungen bei exzentrischer Belastung insbesondere im höher beanspruchten Bereich des Lagers kleiner bleiben als bei unbewehrten Elastomerlagern.

4.2 Exzentrizität e der Vertikallast bei Winkelverdrehungen

Bei bewehrten Elastomerlagern führt das Auftreten einer Klaffung zwischen Lager und Bauteil zu einer deutlichen Verringerung der Exzentrizitätszunahme bei weiterer Steigerung des Auflagerdrehwinkels.

Bis zu Winkelverdrehungen von ca. $\alpha = 0,015$ rad können für die rechnerische Ermittlung der Exzentrizität folgende Ansätze, die wiederum von Topaloff unter Verwendung der aus der Stabstatik bekannten Zusammenhänge abgeleitet wurden, empfohlen werden:

$$\text{runde Lager: } e = \frac{G \cdot D^6 \cdot \alpha}{150 \cdot t^3 \cdot v}$$

rechteckige Lager: $e = \frac{1}{V} \cdot E_{i,M} \cdot \frac{a^3 \cdot b}{12} \cdot \frac{\alpha}{t}$

Hierin sind: D = Durchmesser
 α = Auflagerdrehwinkel pro Elastomerschicht
t = Elastomerdicke pro Schicht
V = Vertikalkraft
 $E_{i,M}$ = ideeller Elastizitätsmodul für Momentenbeanspruchung

$E_{i,M} = E \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^2 \cdot \frac{1}{\eta_M}$ mit

b/a	0,5	1,0	2,0	∞
η_M	34,2	21,5	17,9	15,0

Die Berücksichtigung ungewollter Verdrehungswinkel sollte durch Vergrößerung des planmäßigen Winkels α um den Anteil $\alpha_u = 1/150 \cdot n = 0,0067/n$ rad erfolgen.

Der Einfluß von Mehrfachverdrehungen und Kriechverformungen auf die Größe der Exzentrizität ist vernachlässigbar gering.

4.3 Horizontalverschiebung w und aufnehmbare Horizontalkraft H

Der Bewegungswiderstand bewehrter Elastomerlager gegenüber Horizontalkraftbeanspruchung ist größer als der unbewehrter Elastomerlager. Vor der ersten Bewegung wird er vor allem durch den Formschluß zwischen Elastomer und Kontaktfläche bestimmt. Bei der Festlegung zulässiger Horizontalkräfte bewehrter Elastomerlager ist daher zu berücksichtigen, daß der Bewegungswiderstand nach Überwindung des Formschlusses geringer wird und somit Gleitbewegungen bereits bei kleineren Horizontalkräften auftreten als bei der ersten Horizontalkraftbeanspruchung.

Aufgrund der durchgeführten Versuche kann angegeben werden, daß Horizontalkräfte, die zu Schubverformungen von $\tan \gamma = 0,7 - 1,0$ führen, von lose verlegten, bewehrten Elastomerlagern ohne Gleitbewegungen aufgenommen werden können. Die Horizontalverschiebung w ergibt sich bis zu dieser Beanspruchung nach der bekannten Beziehung

$$w = \gamma \cdot T = \frac{H + V \cdot \alpha/2}{A \cdot G} \cdot T$$

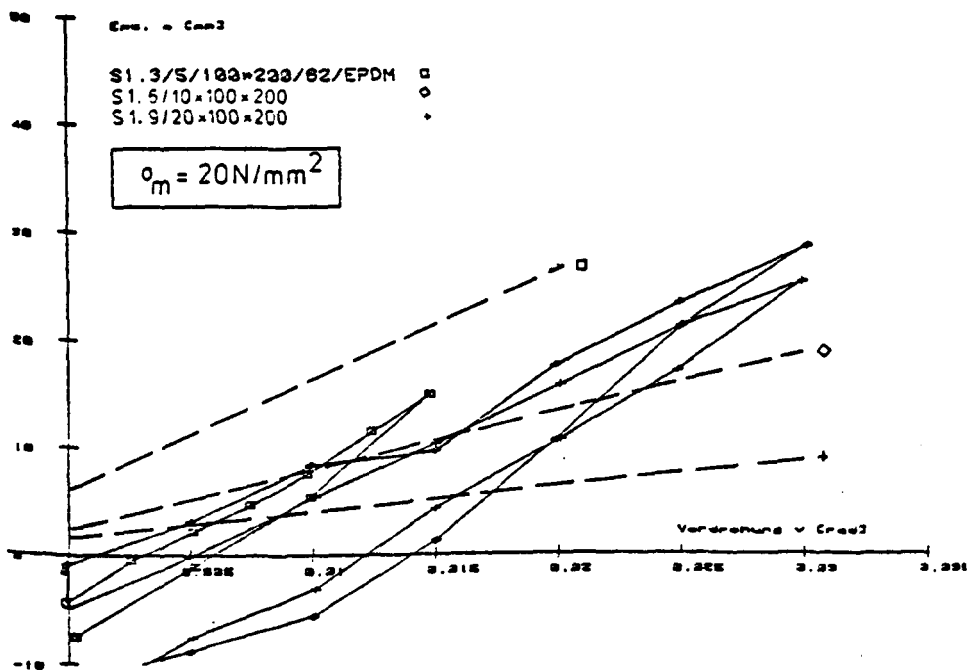
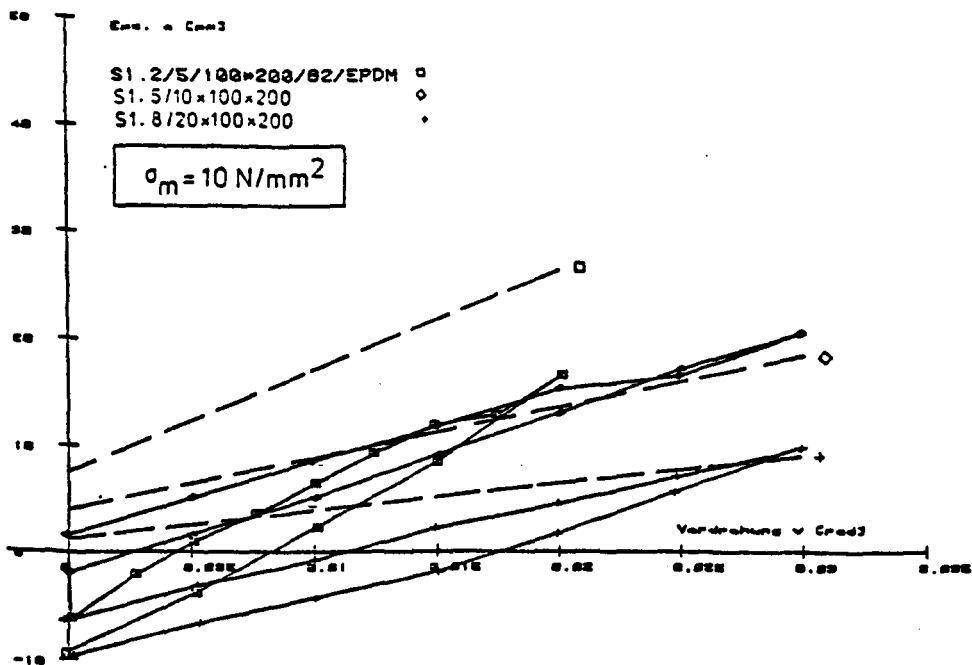
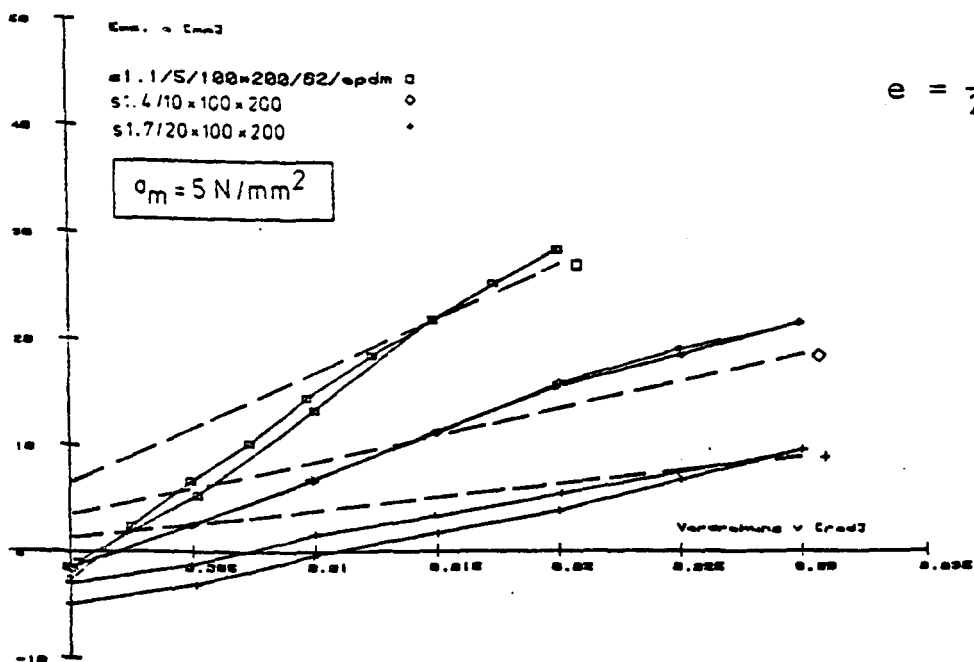
Literaturverzeichnis

- /1/ Iványi, G.; Kordina, K.; Nölting, D.: Tragverhalten von Auflagern im Stahlbetonfertigteilbau bei Verdrehung und Verschiebung der aufliegenden Fertigteile. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godesberg (Az.: BII5-800174-46), durchgeführt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, 1979.
- 2/ Eggert, H.; Grote, J.; Kauschke, W.: Lager im Bauwesen, Bd. I (Entwurf - Berechnung - Planung), Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1974.
- 3/ Richtlinien für die Herstellung und Verwendung von unbewehrten Elastomer-Lagern, Mitteilungen des Instituts für Bautechnik, 3, 6, 1972, S. 7 - 9.
- 4/ Italienische Norm CNR-UNI 10018-68 für Gummilager (1968).
- /5/ Laboratoire de Recherches et de Contrôle du Caoutchouc: Caractéristiques en Compression des Vulcanisats. Bulletin No. 80, Paris (1969).
- /6/ Flohrer, M.: Untersuchungen über die Eignung unbewehrter Elastomerlager als Baulager. Betonstein-Zeitung 37, 11, 1971, S. 707 - 718.
- /7/ Flohrer, M.; Stephan, E.: Bemessungsdiagramme für die Querkraftkräfte bei Elastomerlagern. Die Bautechnik 52, 9, 1975, S. 296 - 301, und 12, 1975, S. 420 - 427.
- /8/ Kordina, K.; Nölting, D.: Zur Auflagerung von Stahlbetonbauteilen mittels unbewehrter Elastomerlager. Der Bauingenieur 56, 1981, S. 41 - 44.
- /9/ Schorn, H.: Beitrag zum Verformungsverhalten elastomerer Lagerwerkstoffe. Dissertation RWTH Aachen, 1972.

- /10/ Schrage, I.: Über den Bewegungswiderstand von unverankerten Elastomer-Lagern. Dissertation, RWTH Aachen, 1979.
- /11/ Topaloff, B.: Gummilager für Brücken - Berechnung und Anwendung. Der Bauingenieur 39, 2, 1964, S. 50 - 64.

A N H A N G A

BILDER A 1 BIS A 289



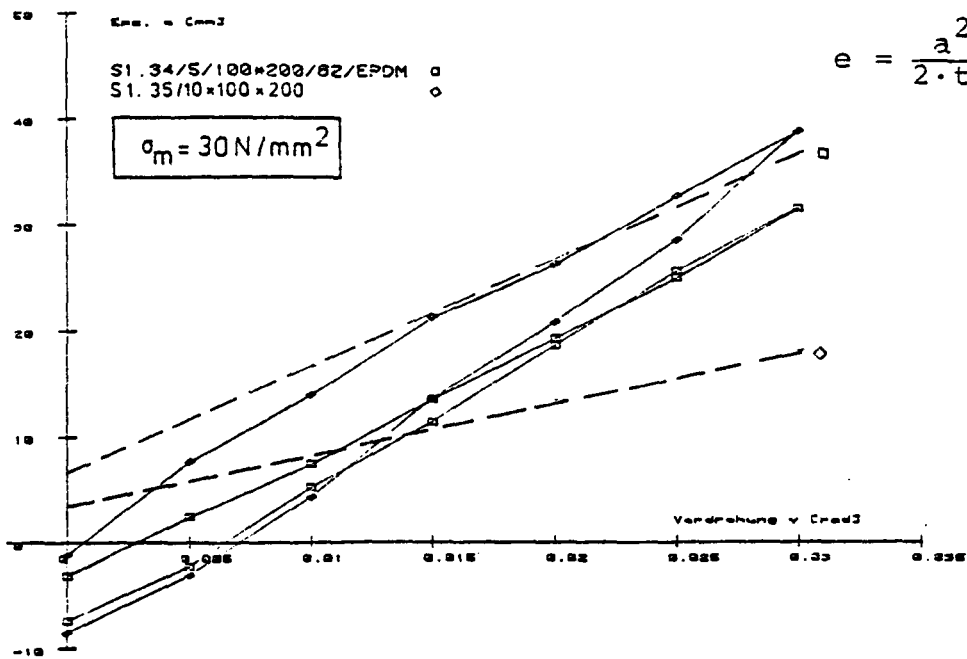


Bild: A 4

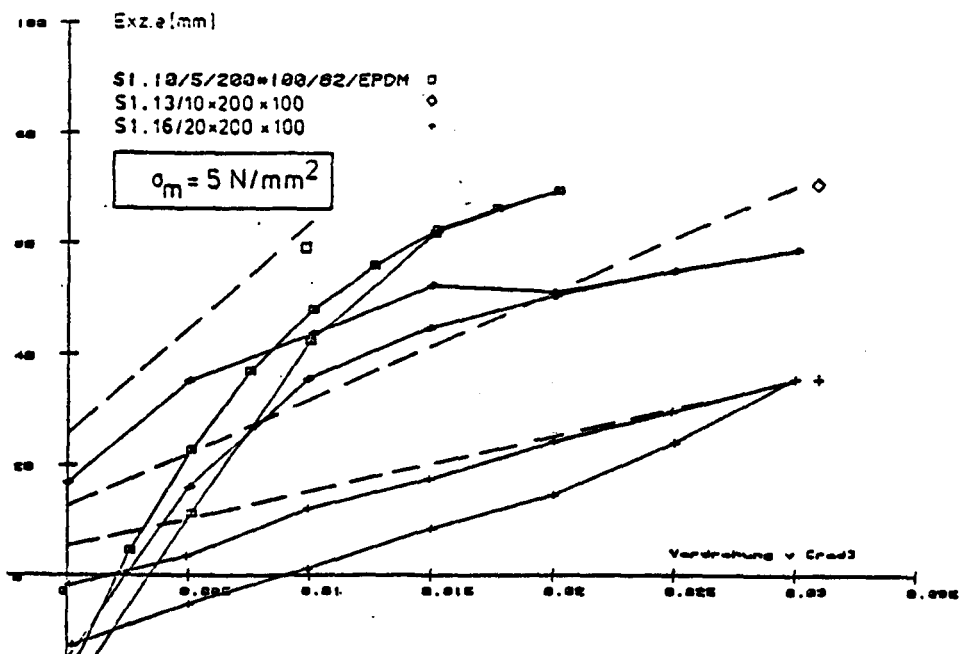


Bild: A 5

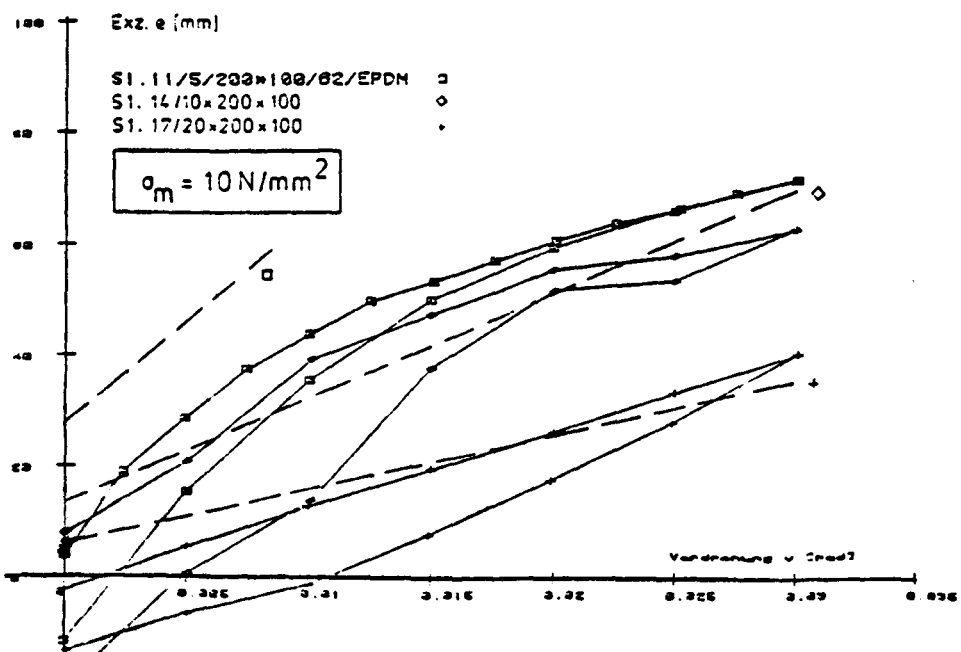
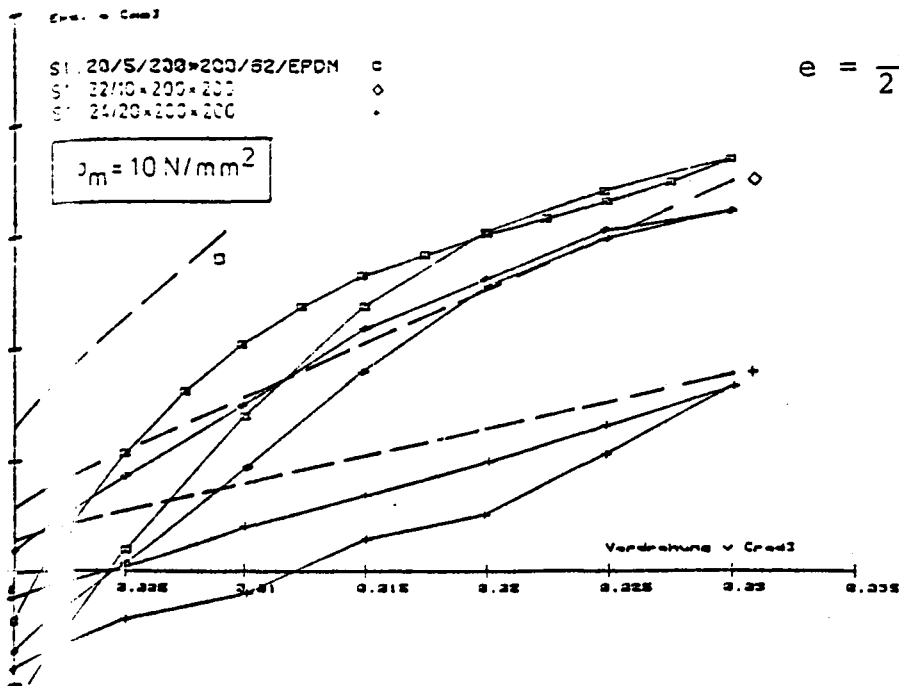


Bild: A 6



$$e = \frac{a^2}{2 \cdot t} \cdot \left(\frac{1}{150} + \alpha \right) : \text{---}$$

Bild: A 10

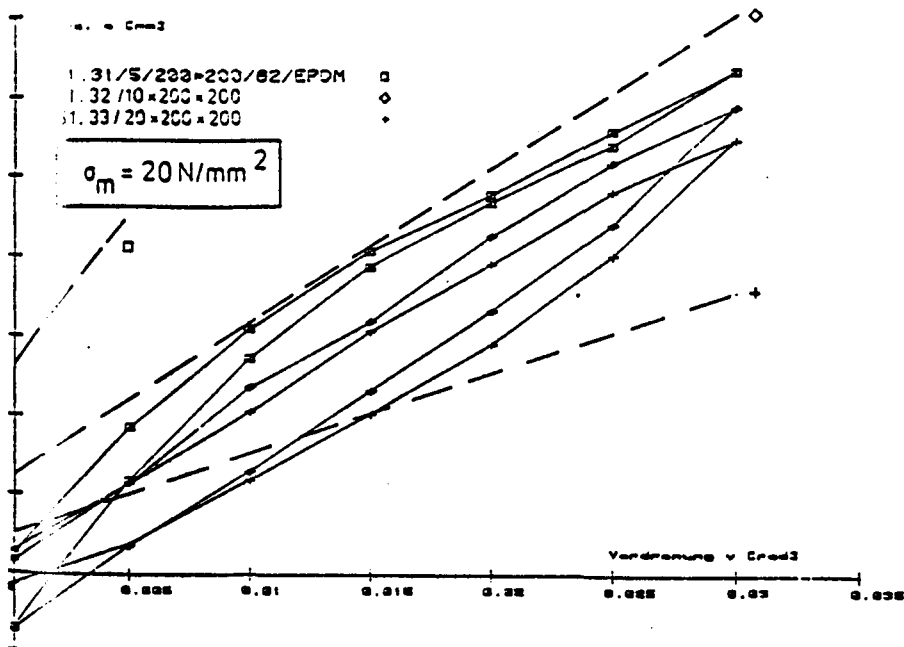


Bild: A 11

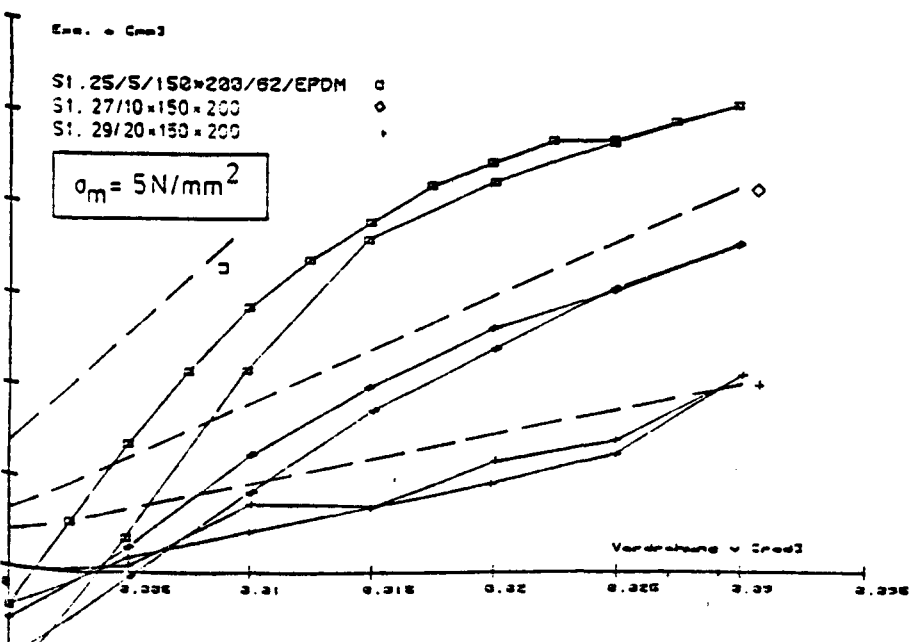


Bild: A 12

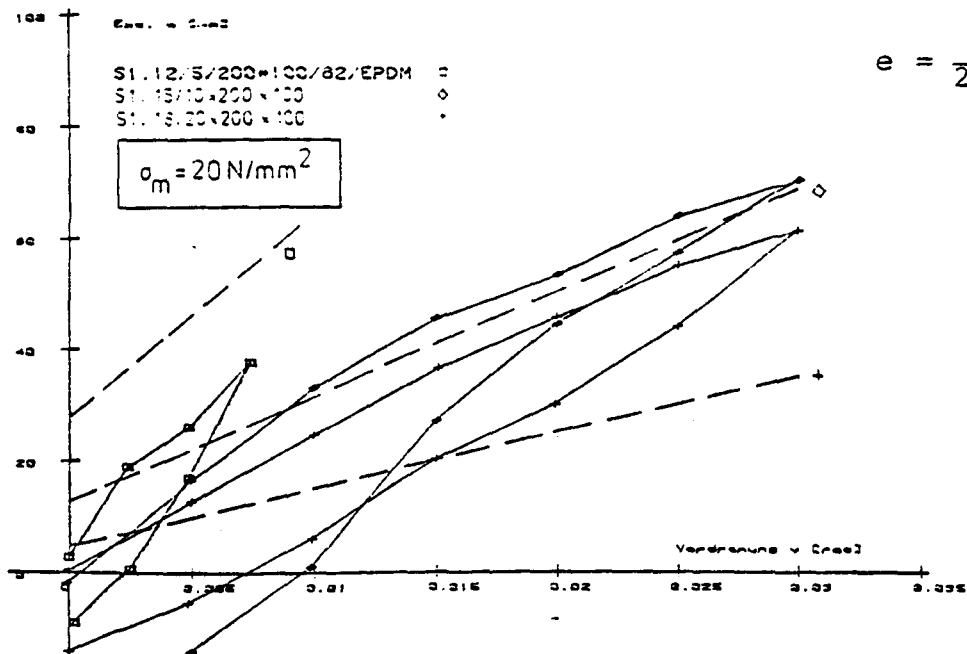


Bild: A 7

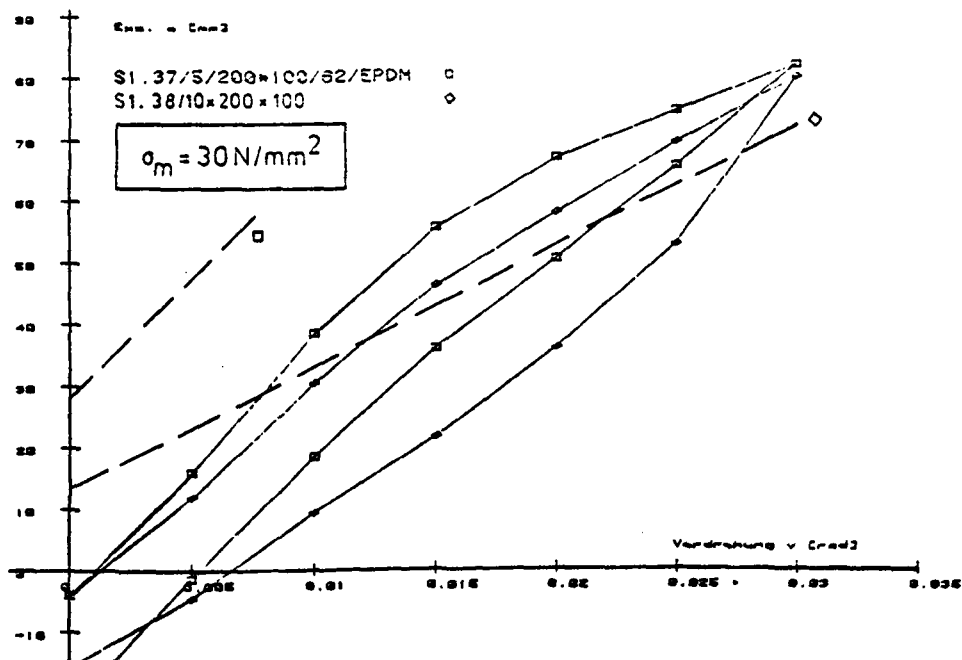


Bild: A 8

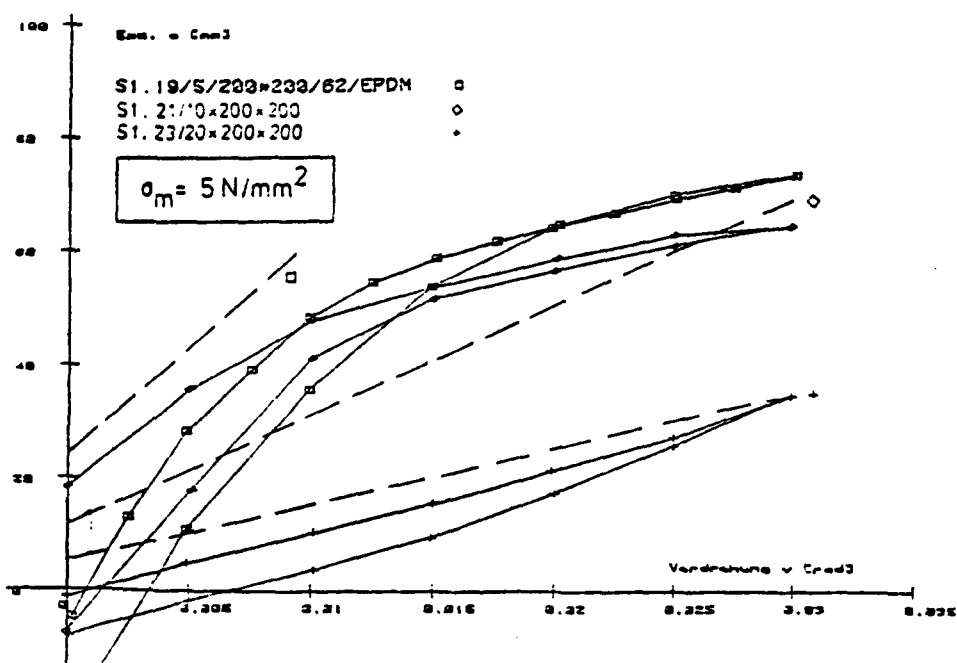


Bild: A 9

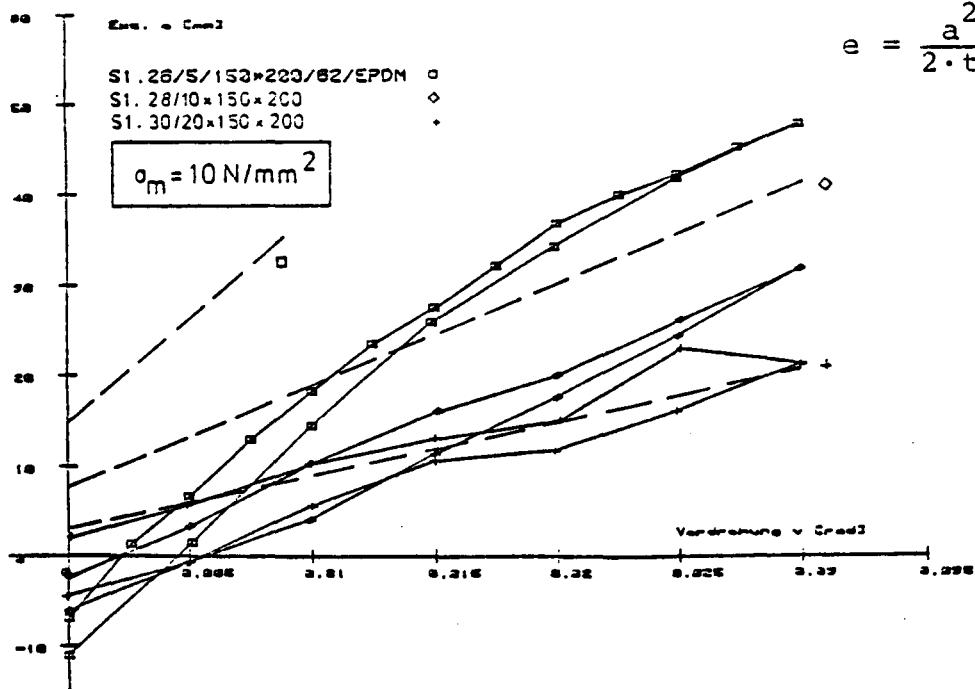


Bild: A 13

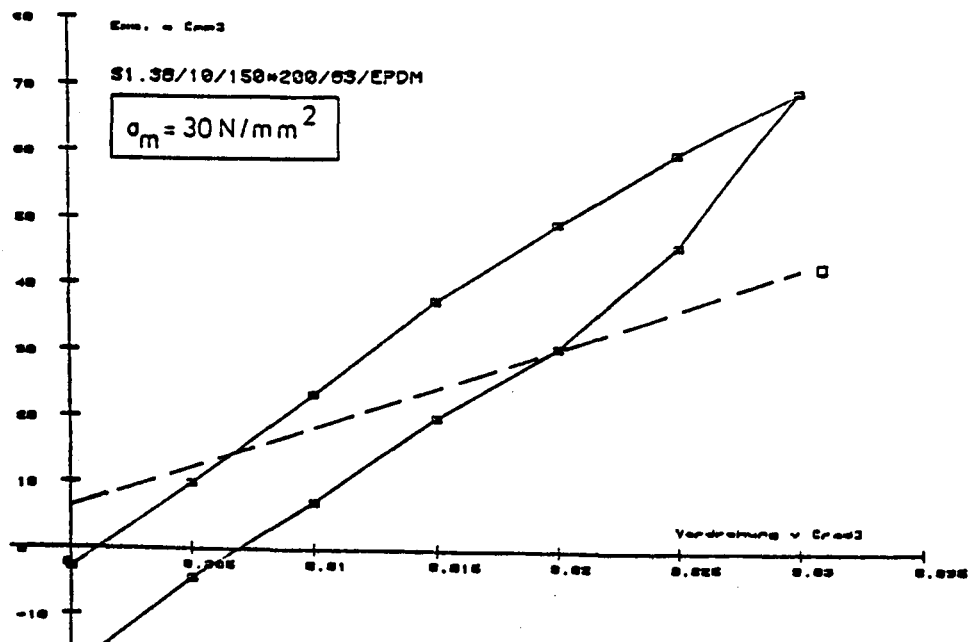


Bild: A 14

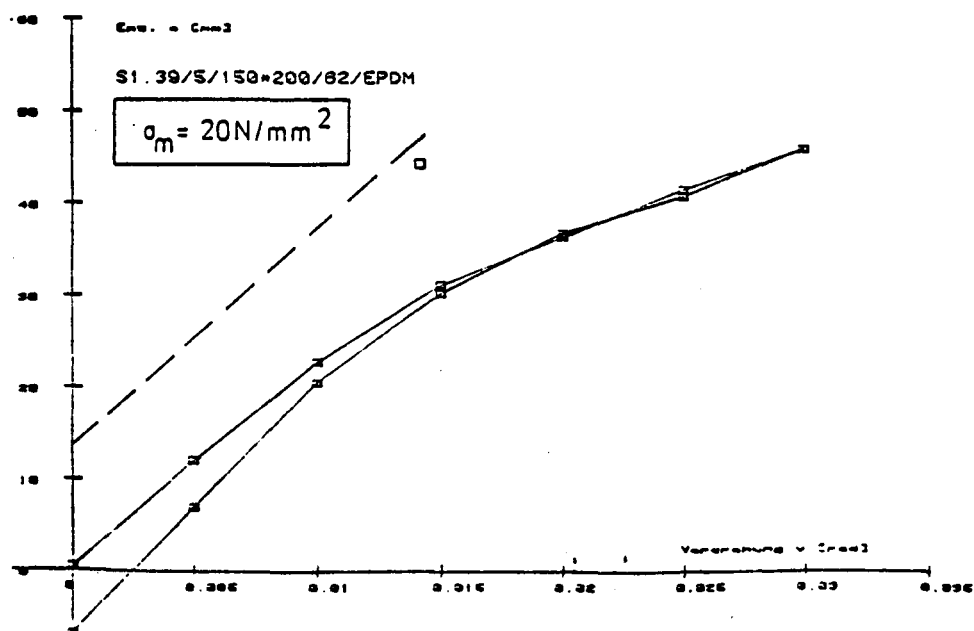


Bild: A 15

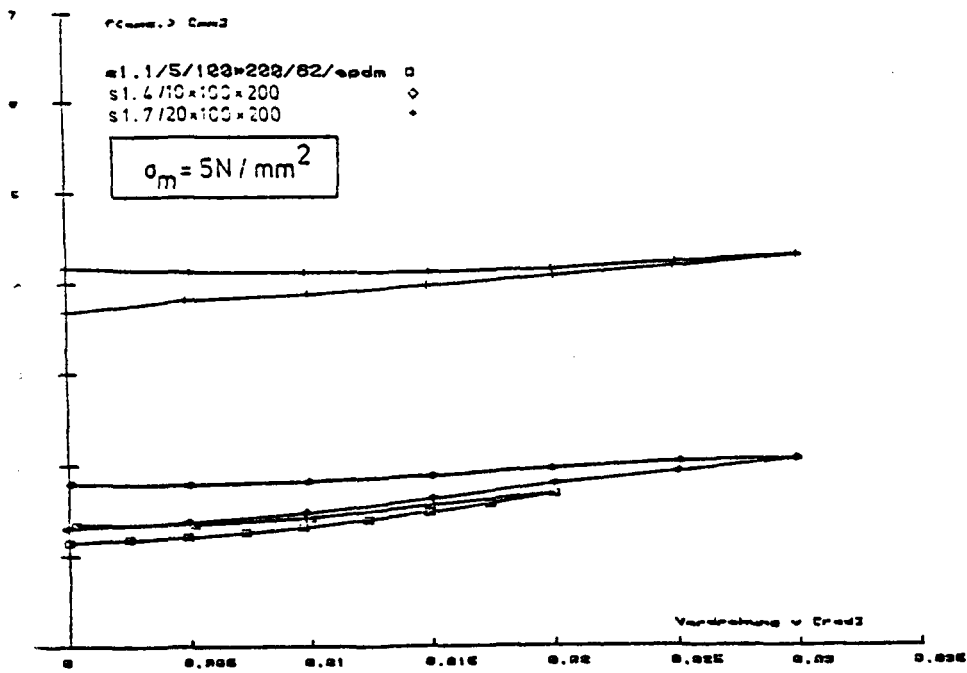


Bild: A 16

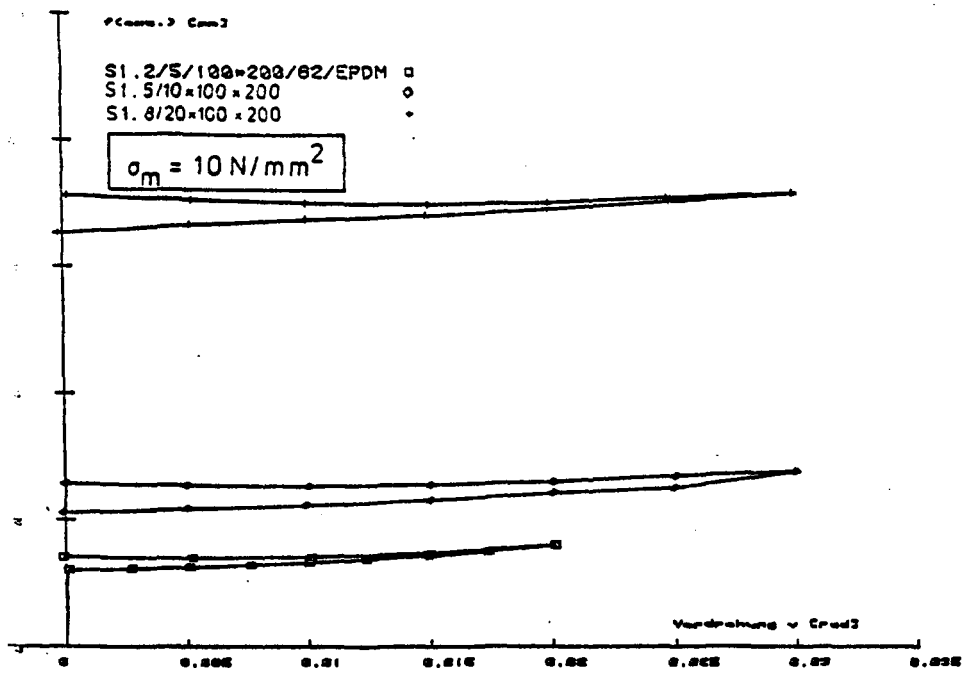


Bild: A 17

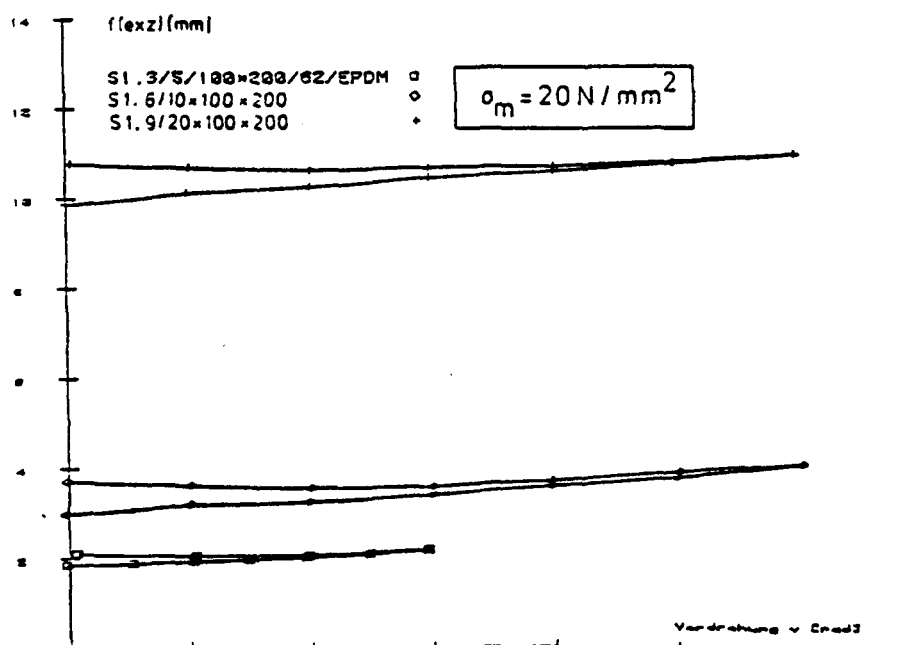


Bild: A 18

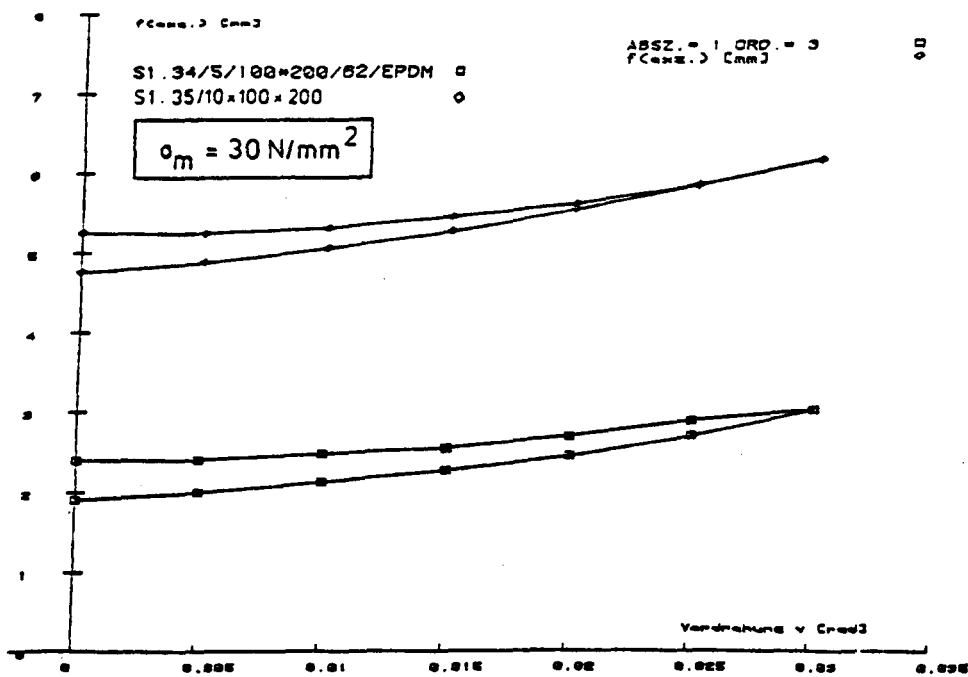


Bild: A 19

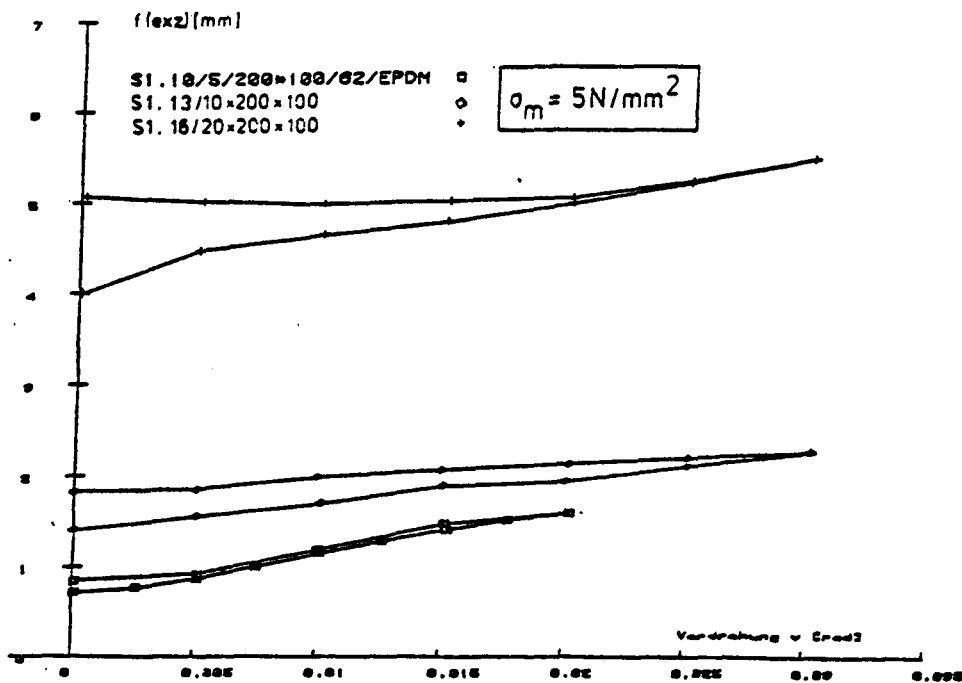


Bild: A 20

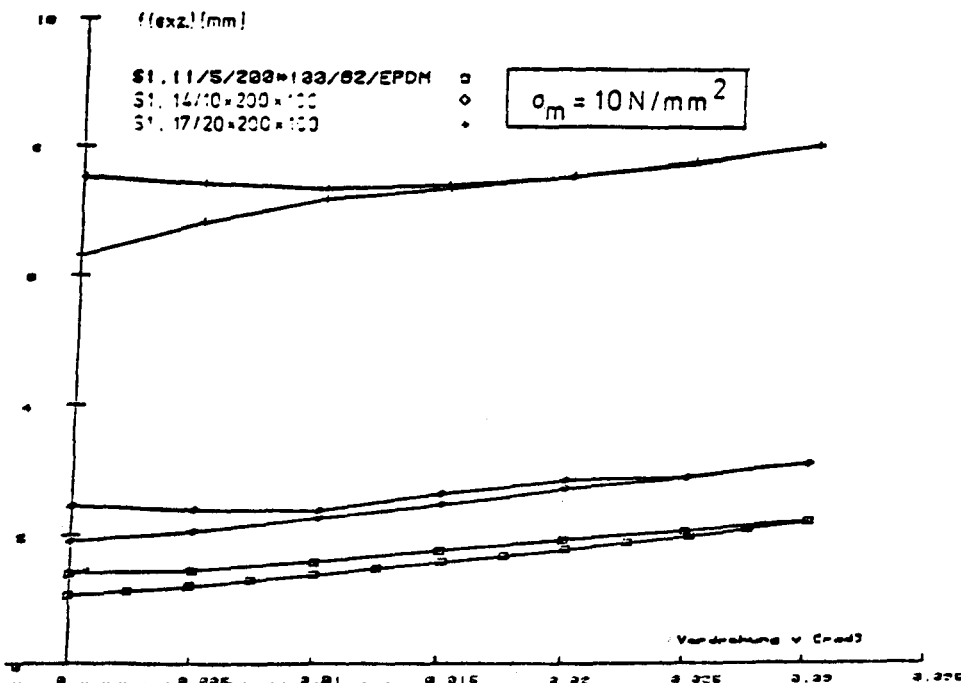


Bild: A 21

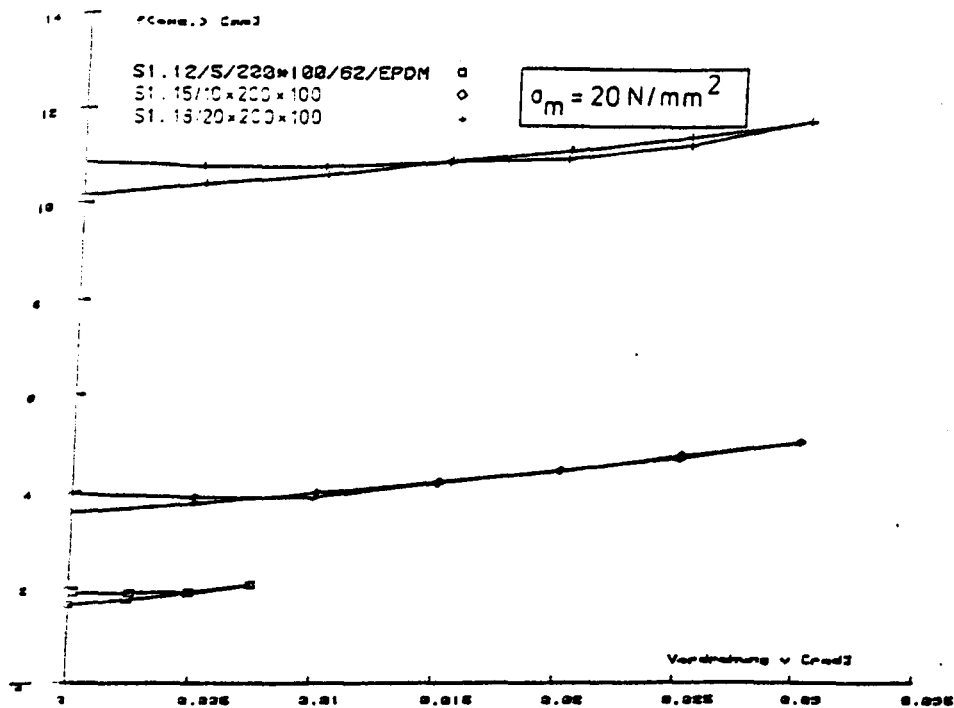


Bild: A 22

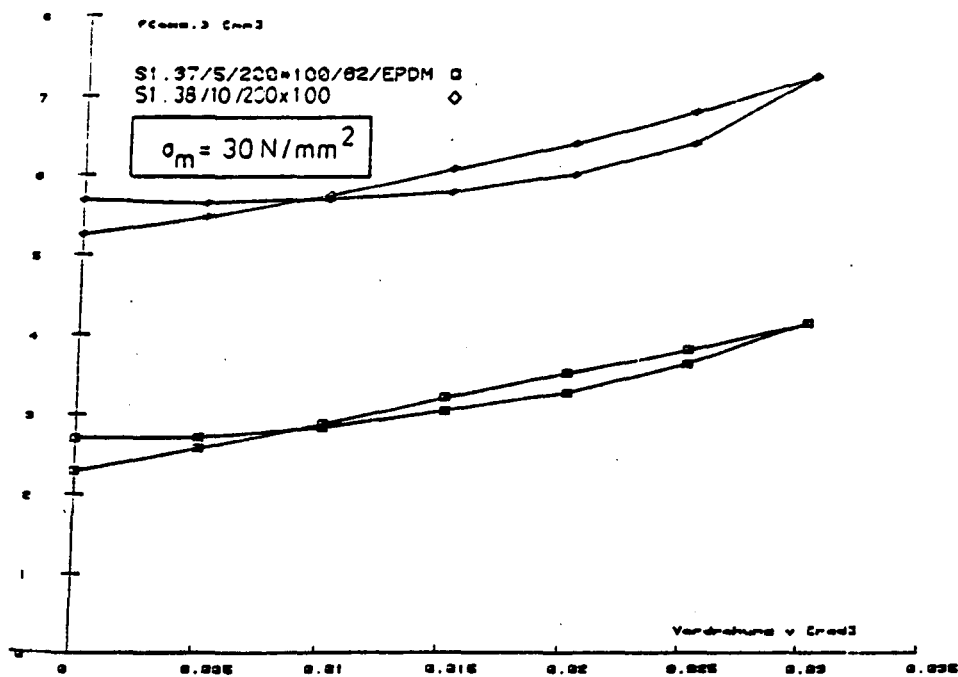


Bild: A 23

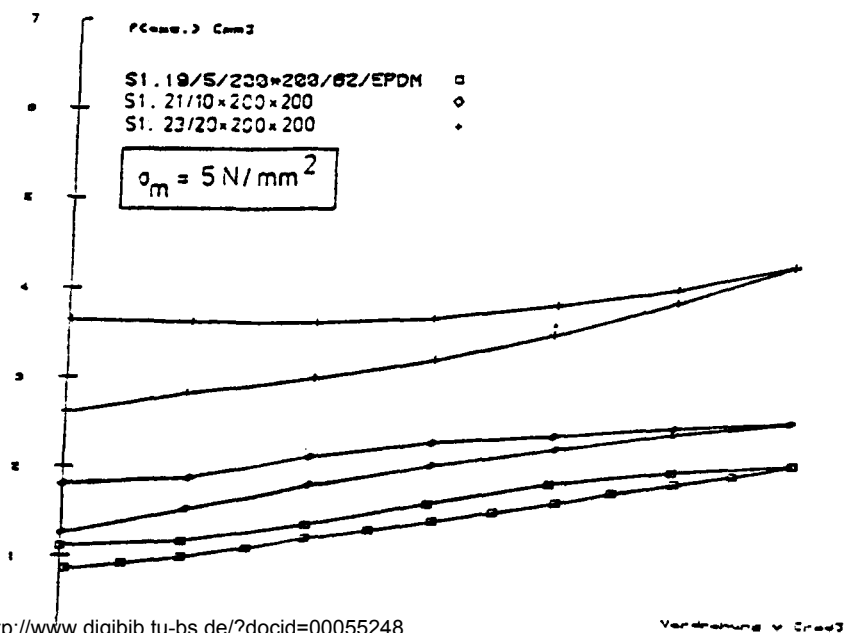


Bild: A 24

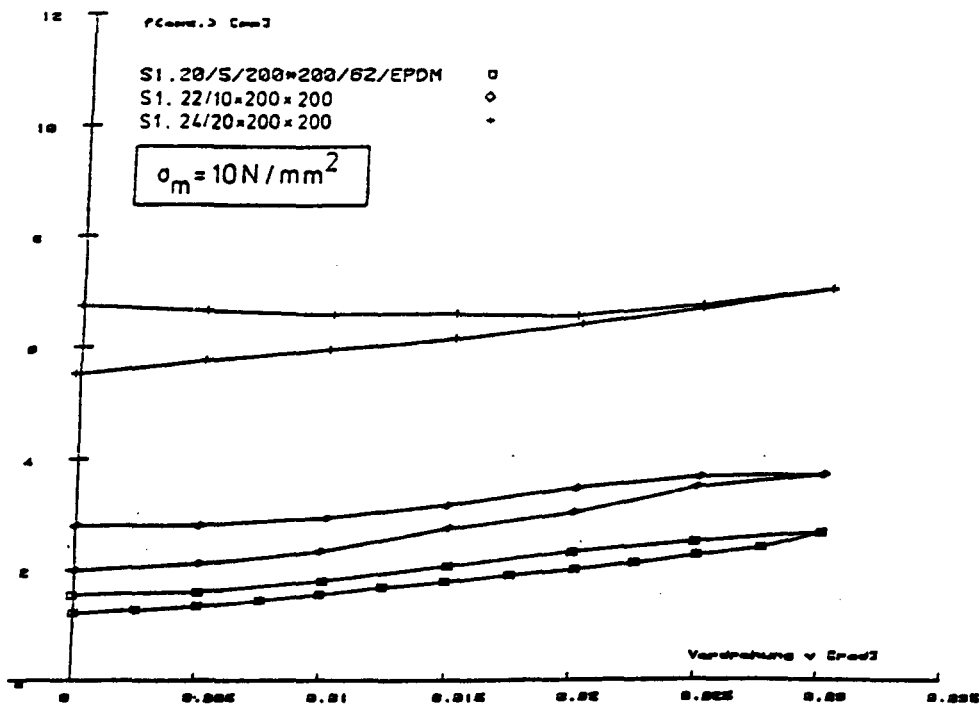


Bild: A 25

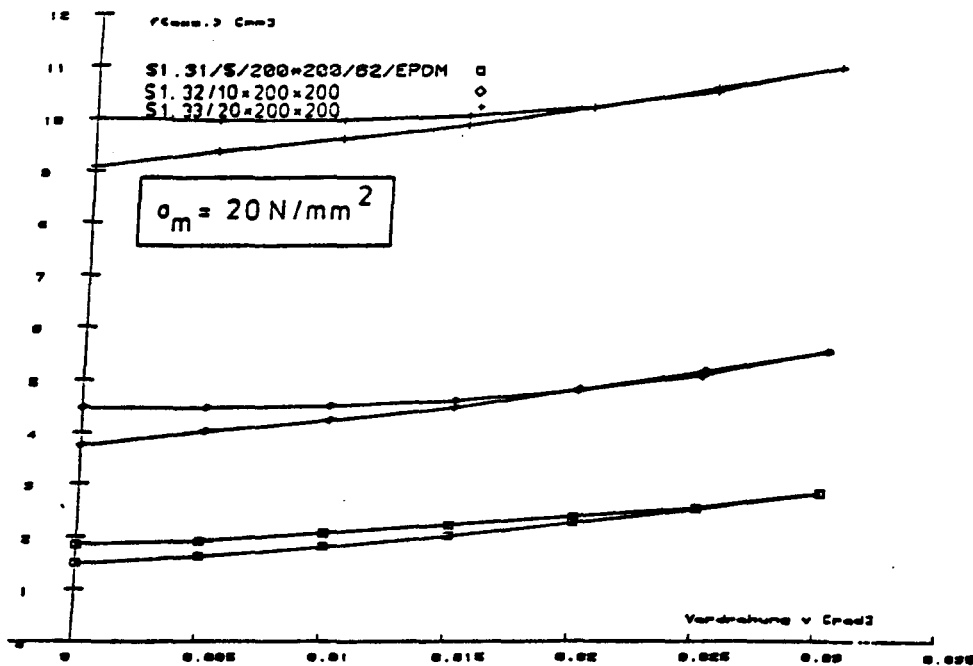


Bild: .A 26

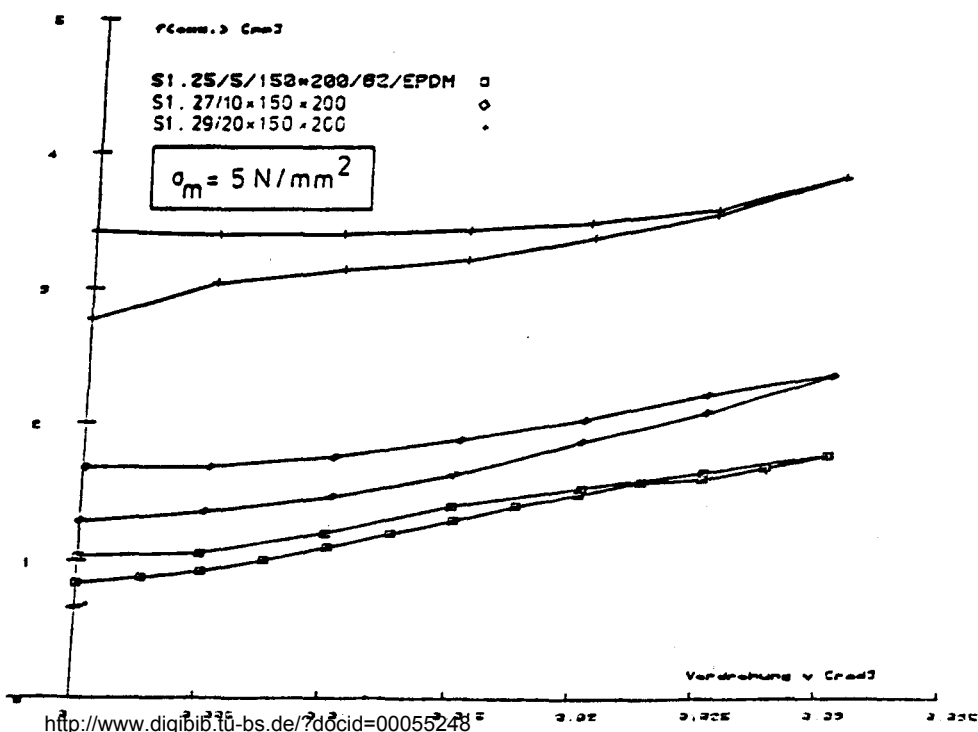


Bild: A 27

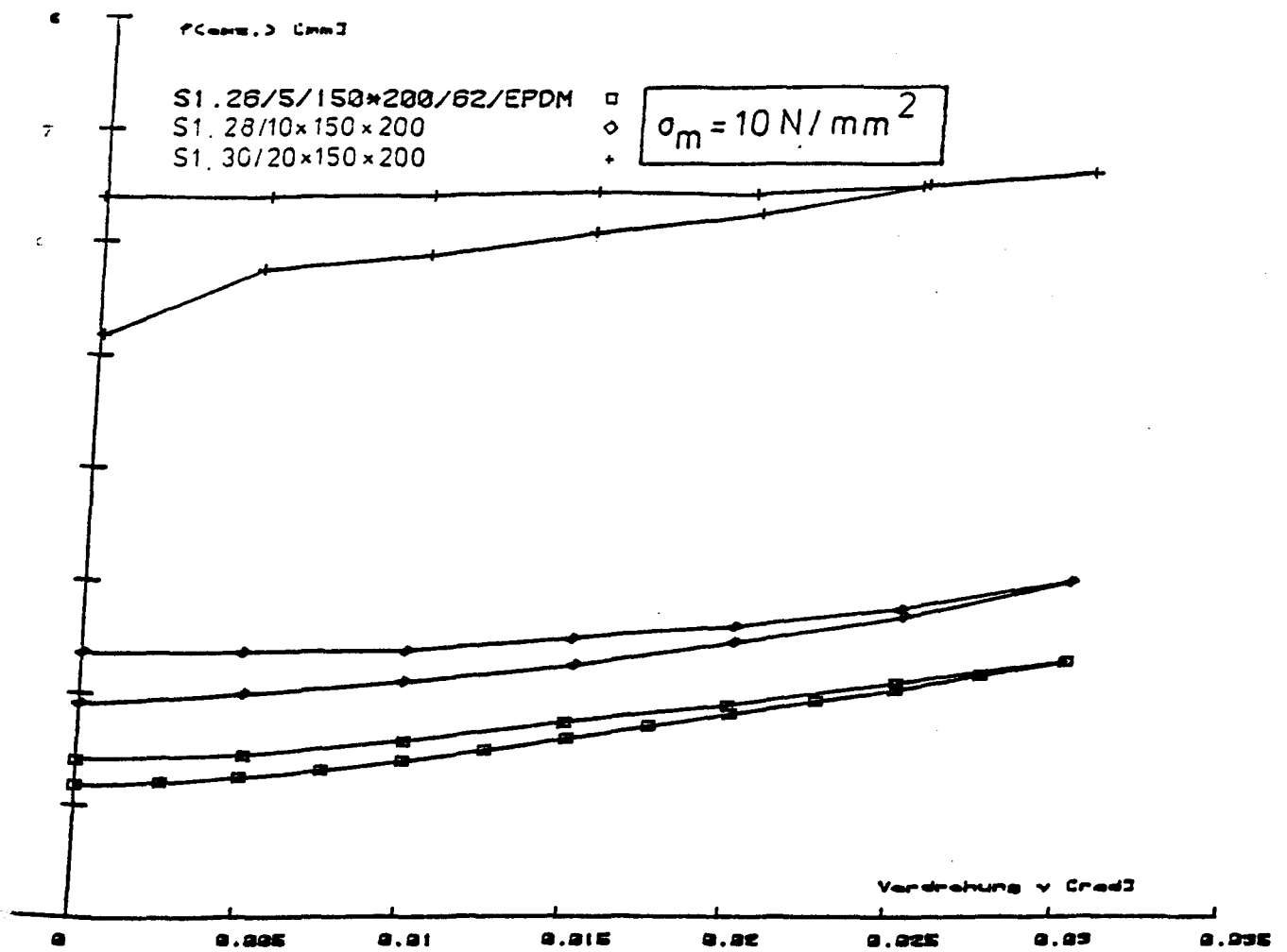


Bild: A 28

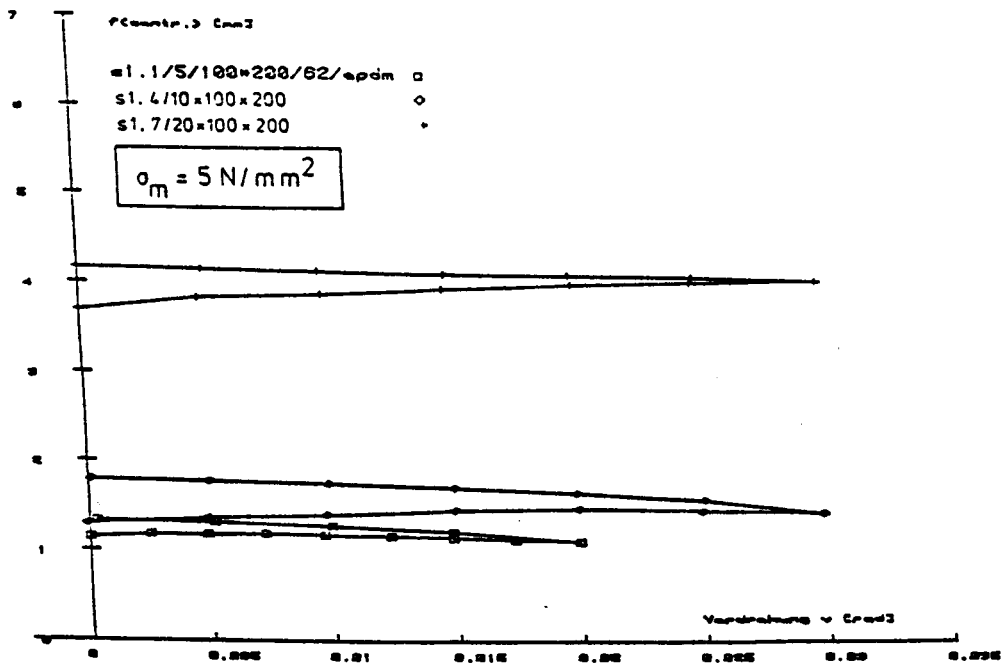


Bild: A 29

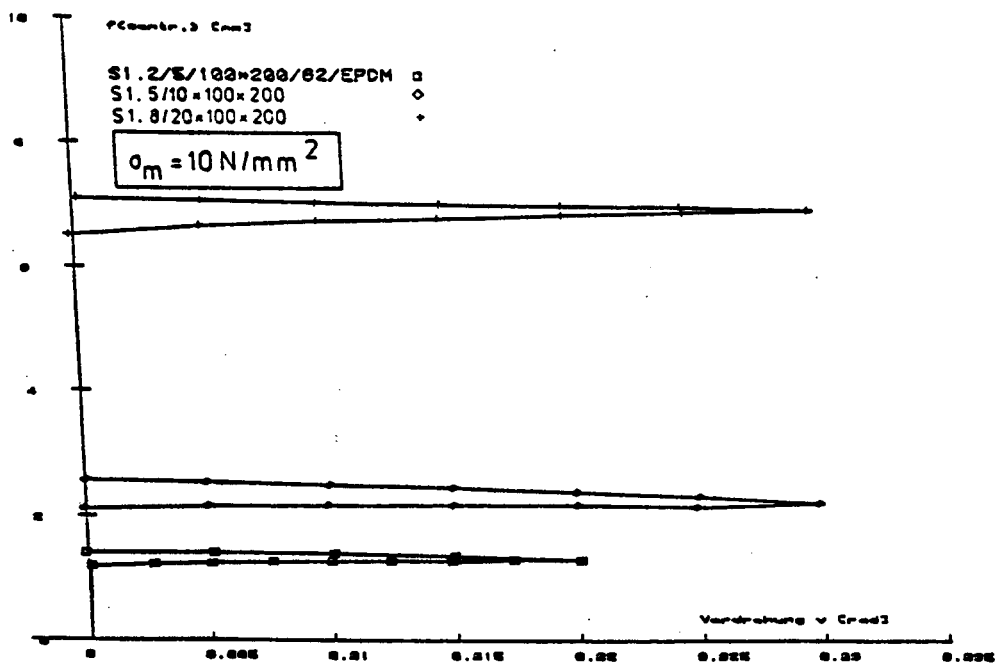


Bild: A 30

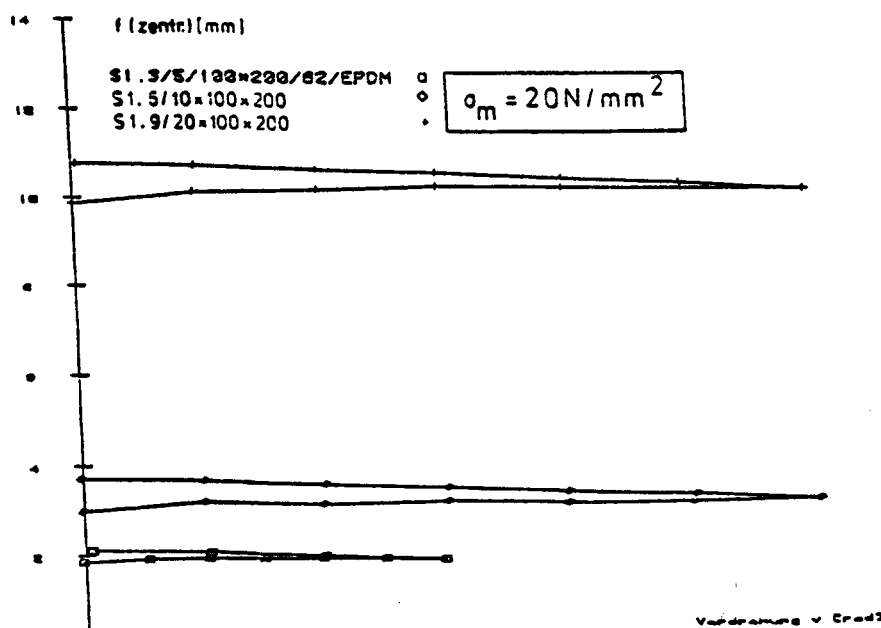


Bild: A 31

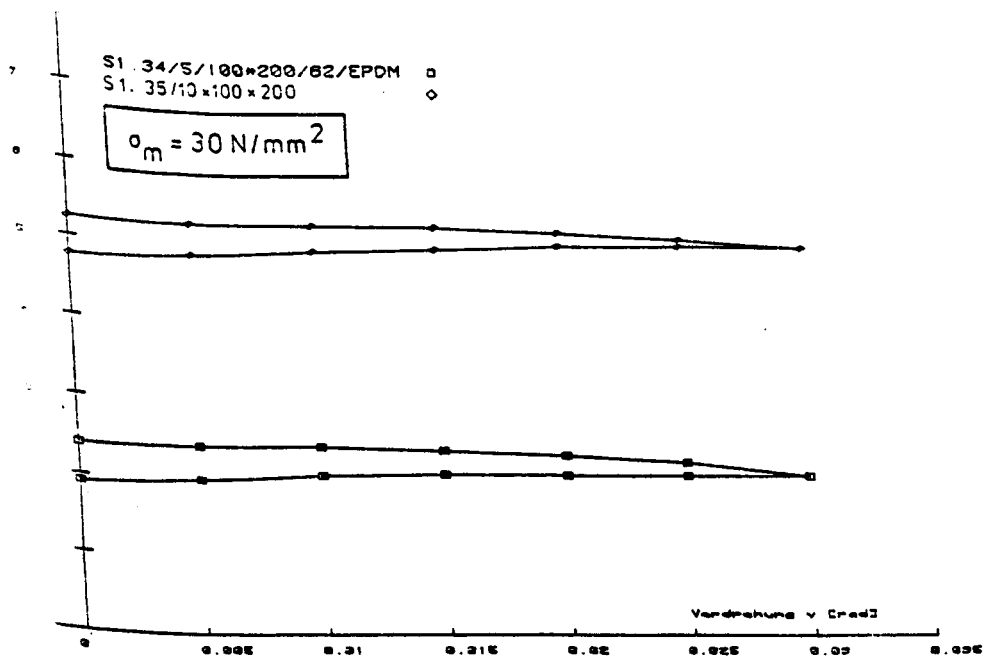


Bild: A 32

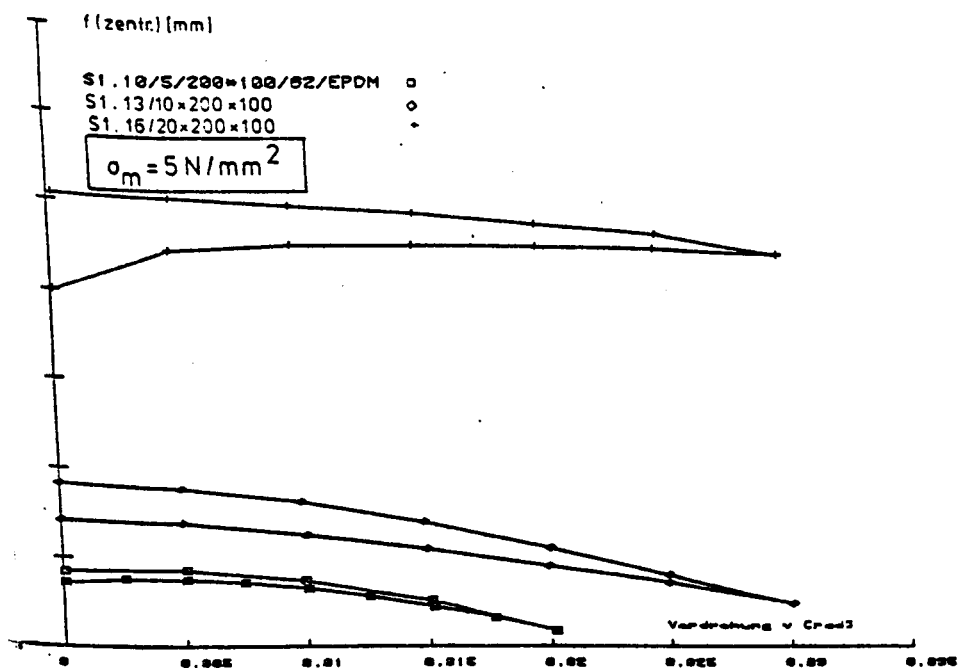


Bild: A 33

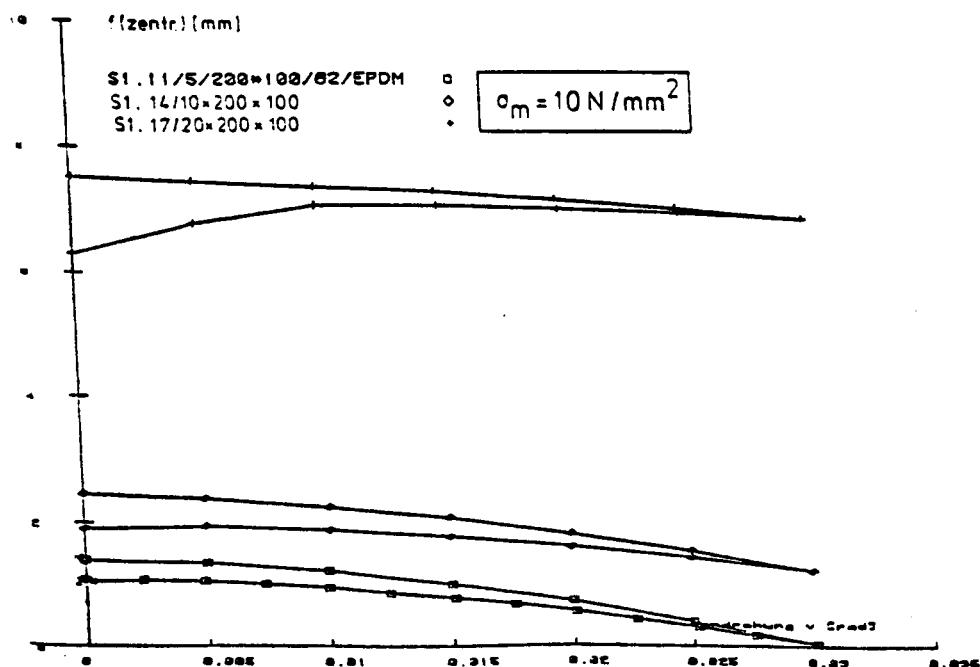


Bild: A 34

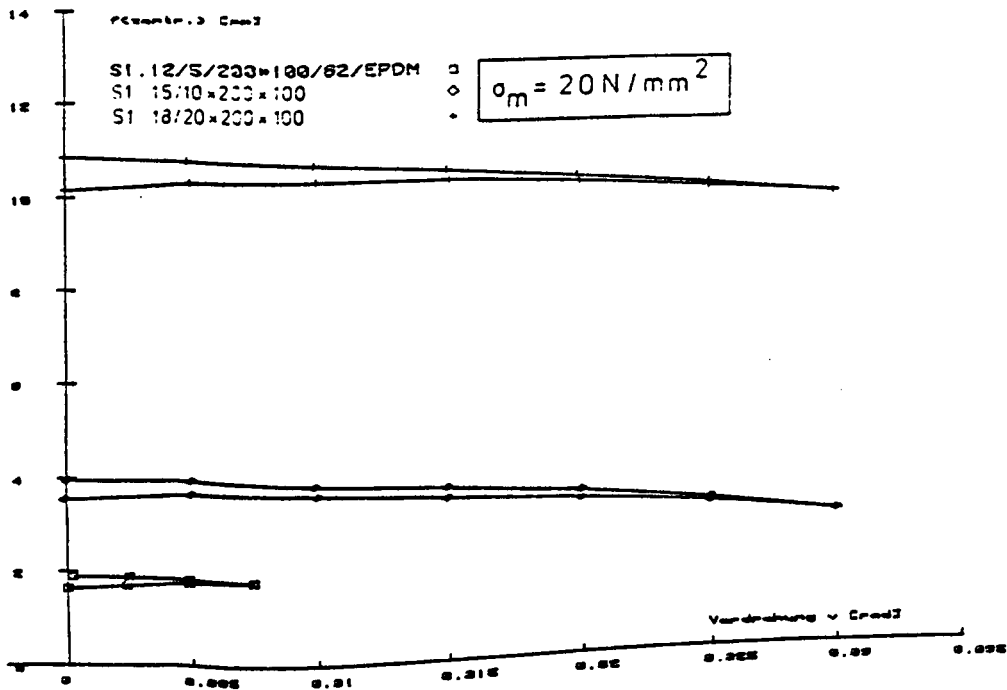


Bild: A 35

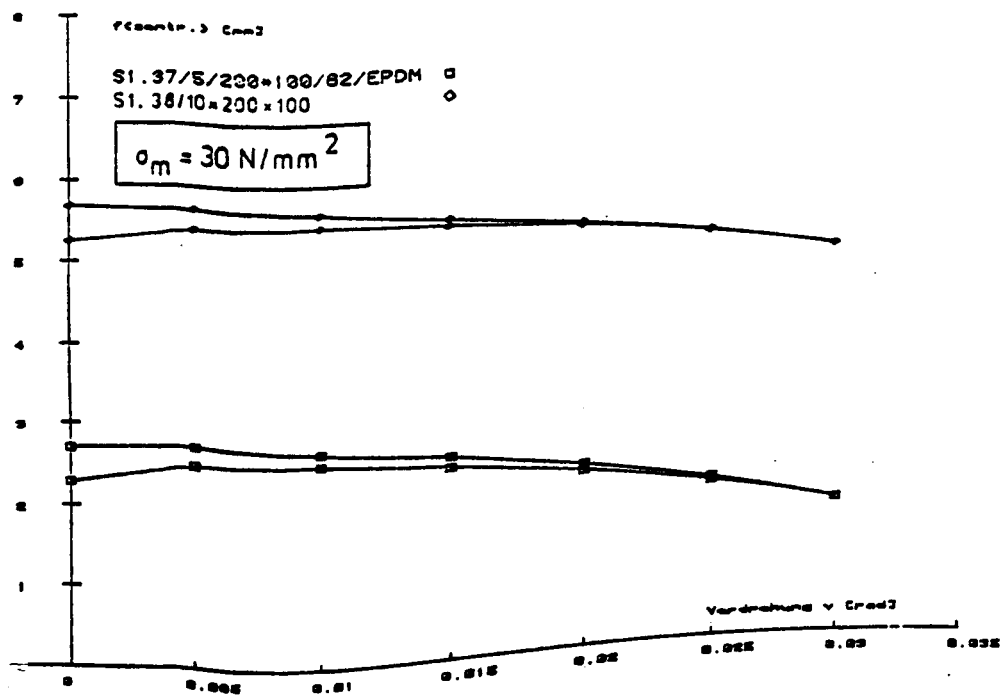


Bild: A 36

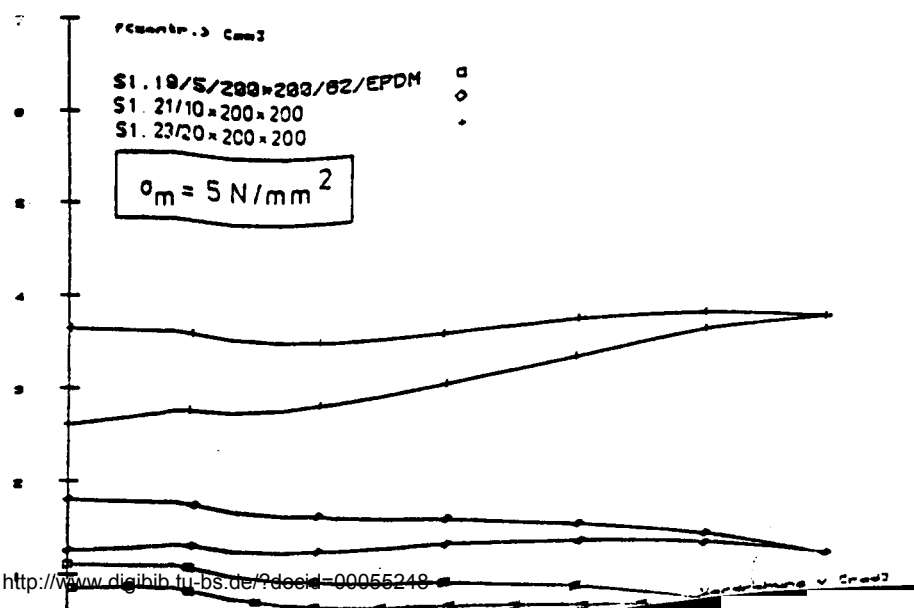


Bild: A 37

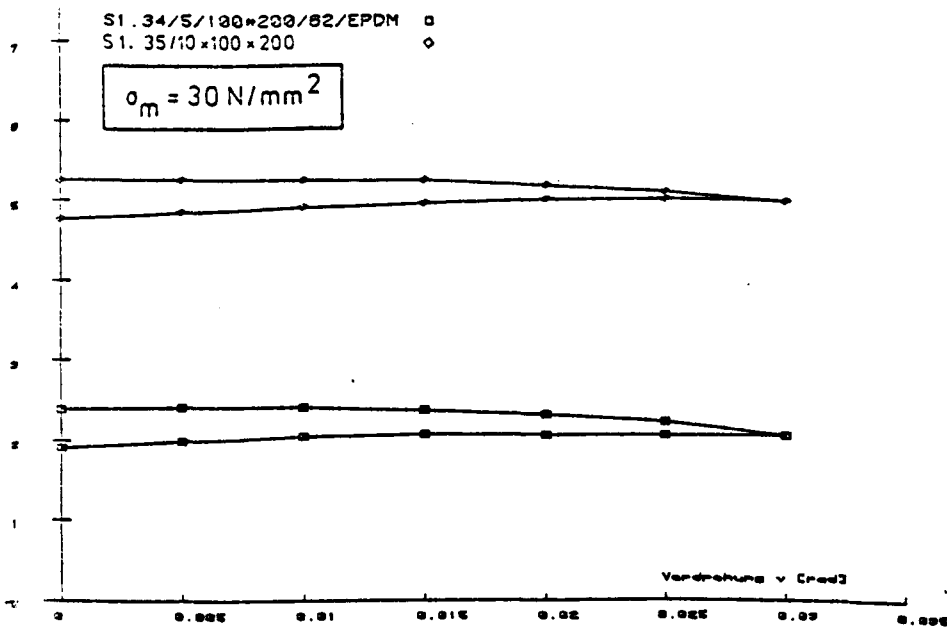


Bild: A 32

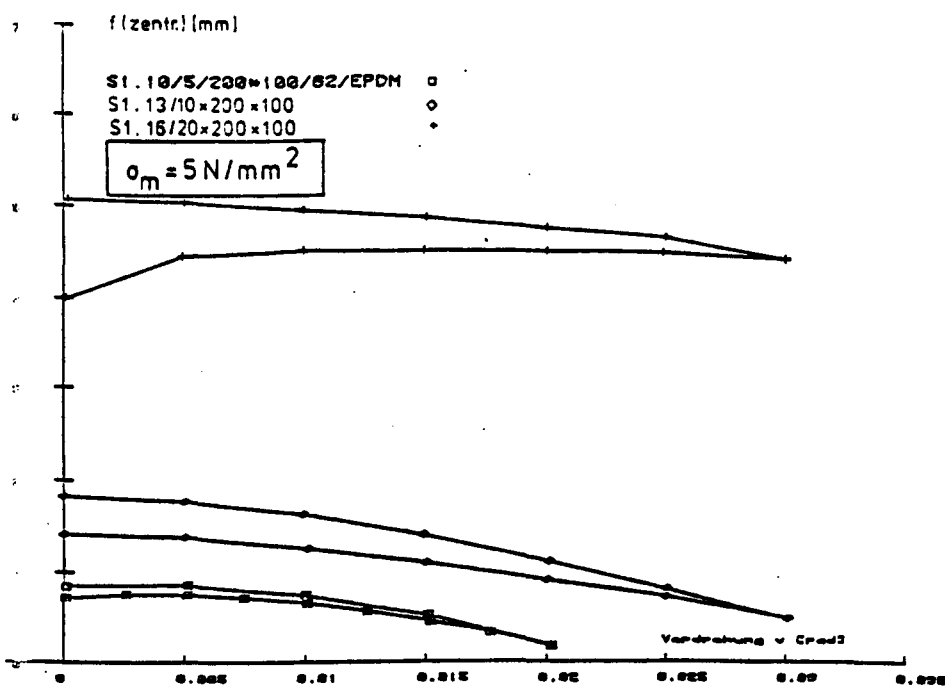


Bild: A 33

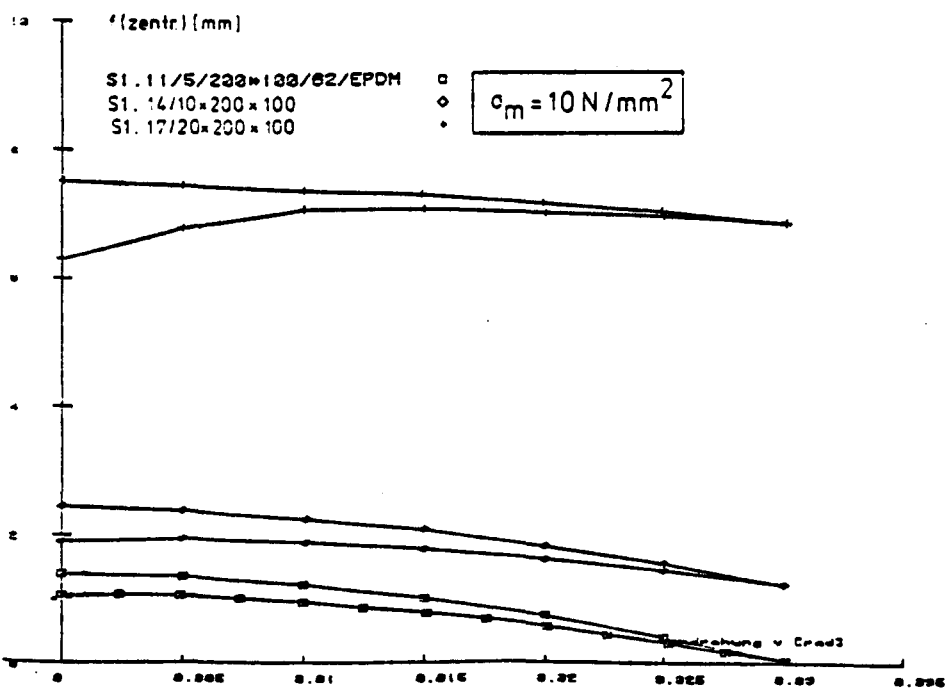


Bild: A 34

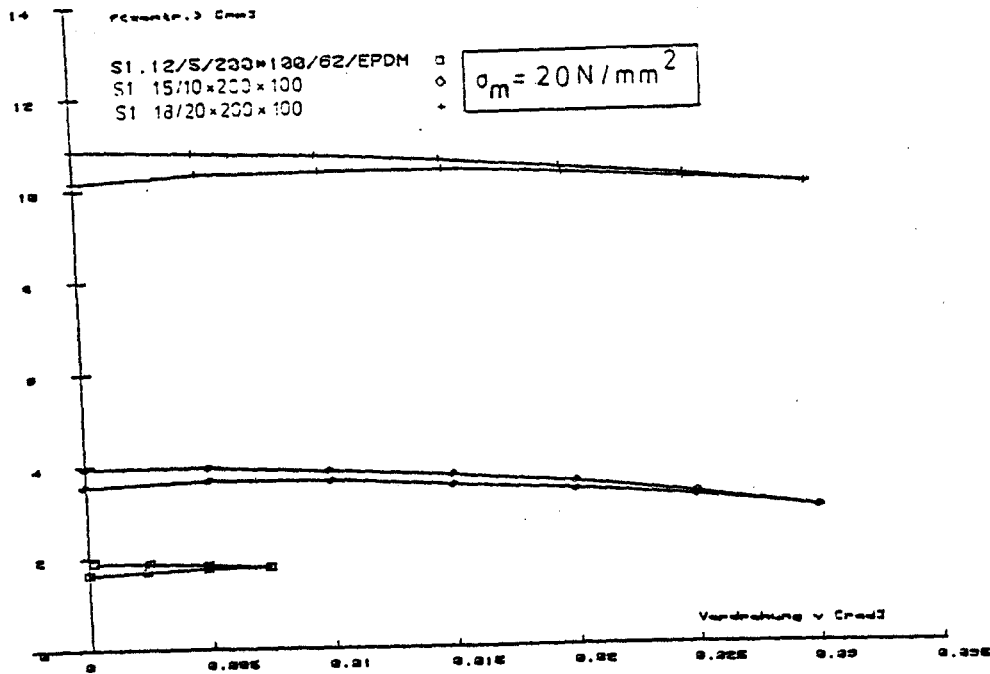


Bild: A 35

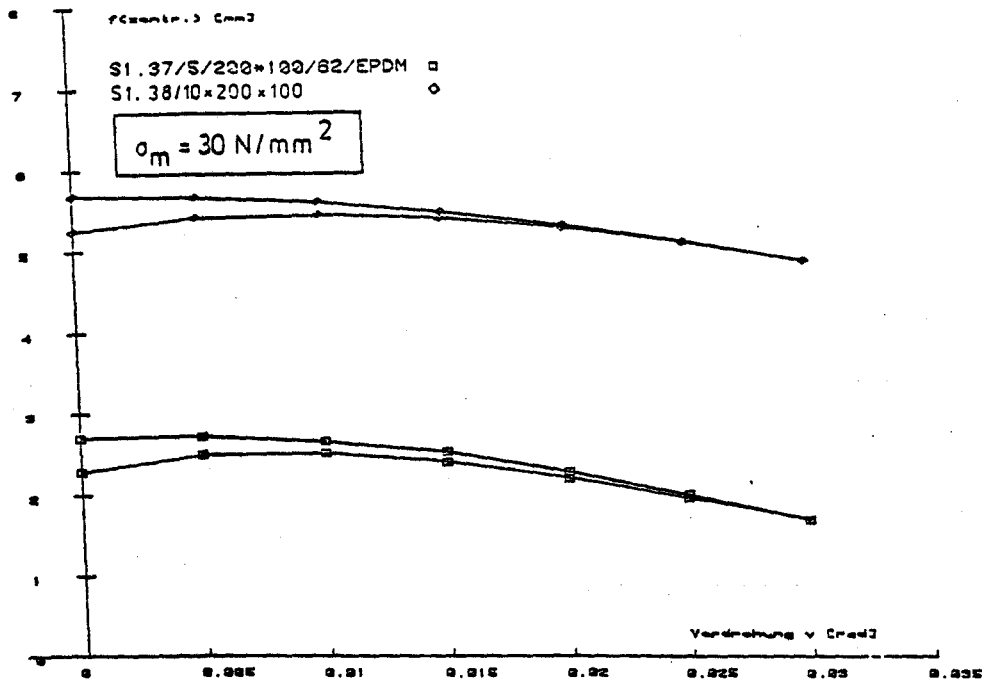


Bild: A 36

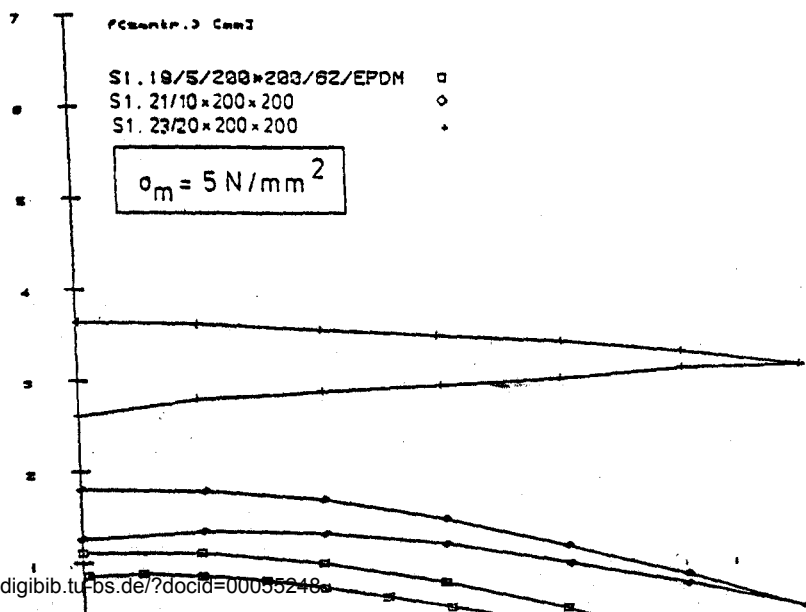


Bild: A 37

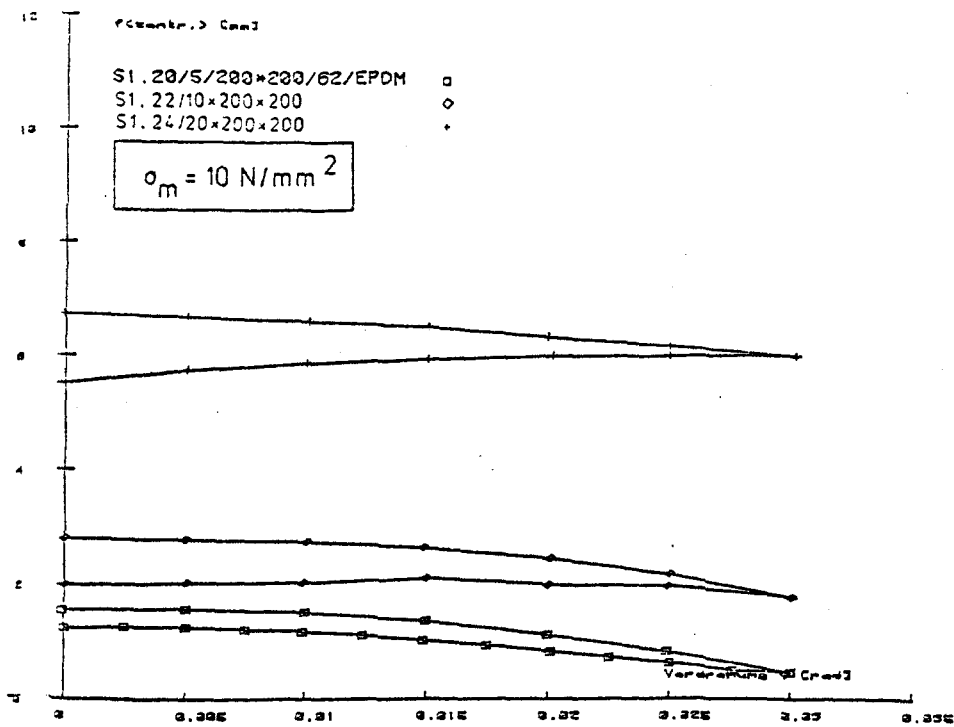


Bild: A 38

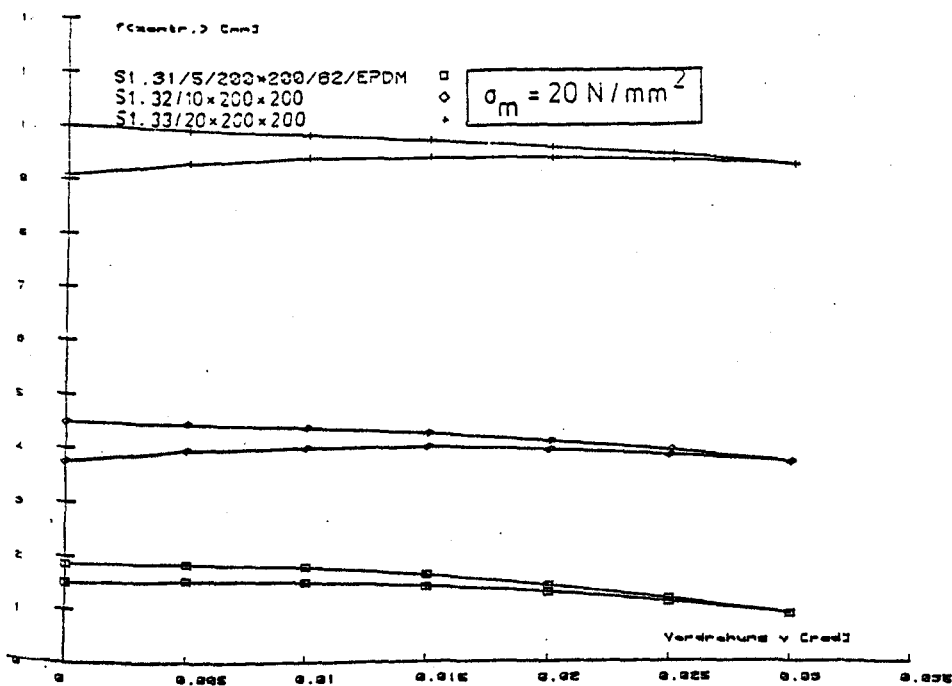


Bild: A 39

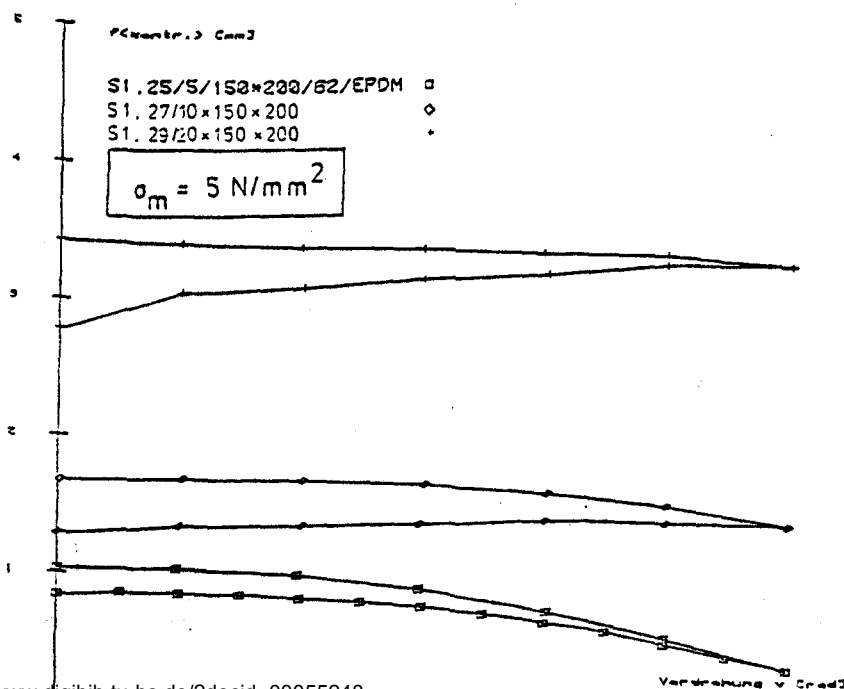


Bild: A 40

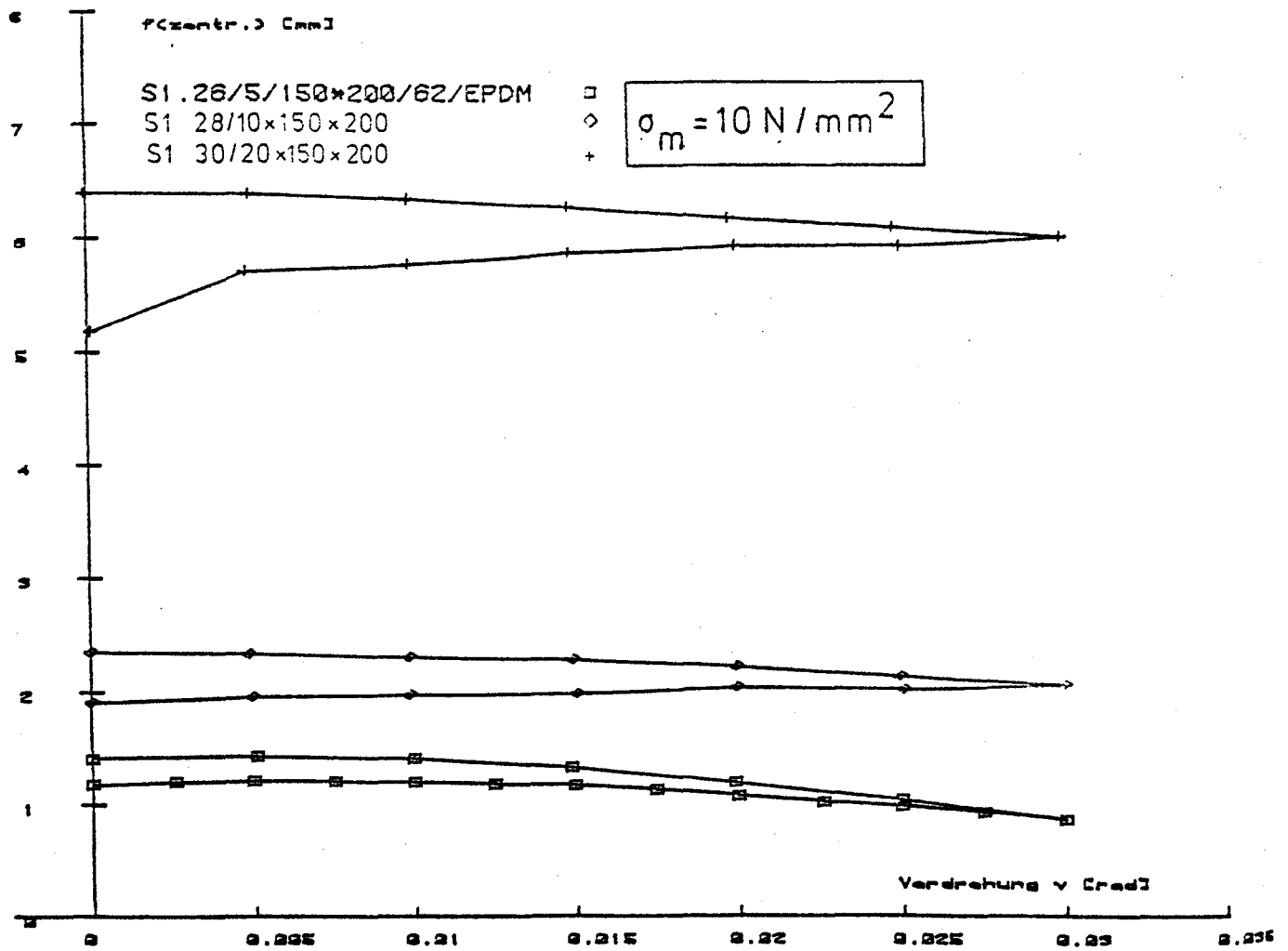


Bild: A 41

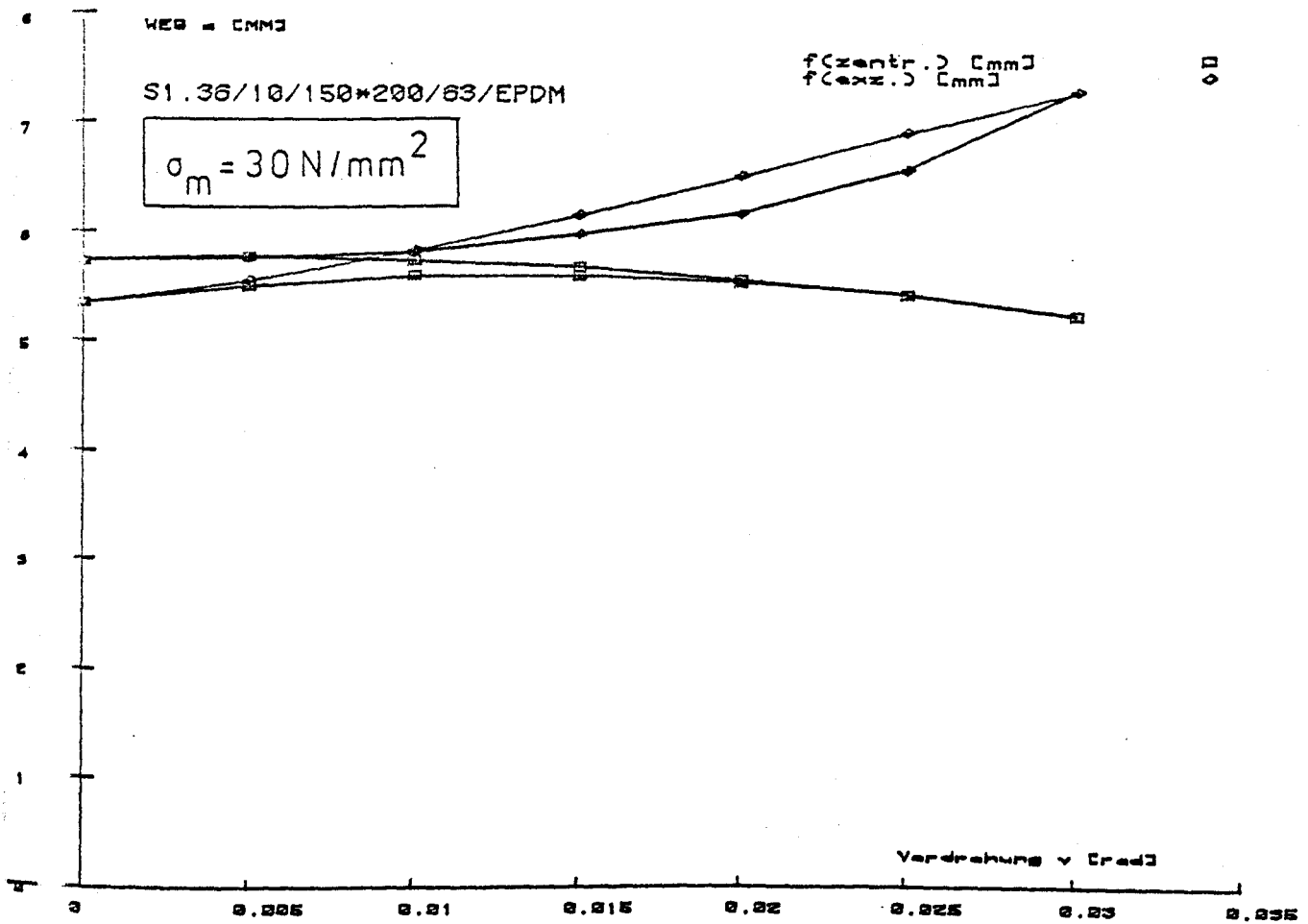


Bild: A 42

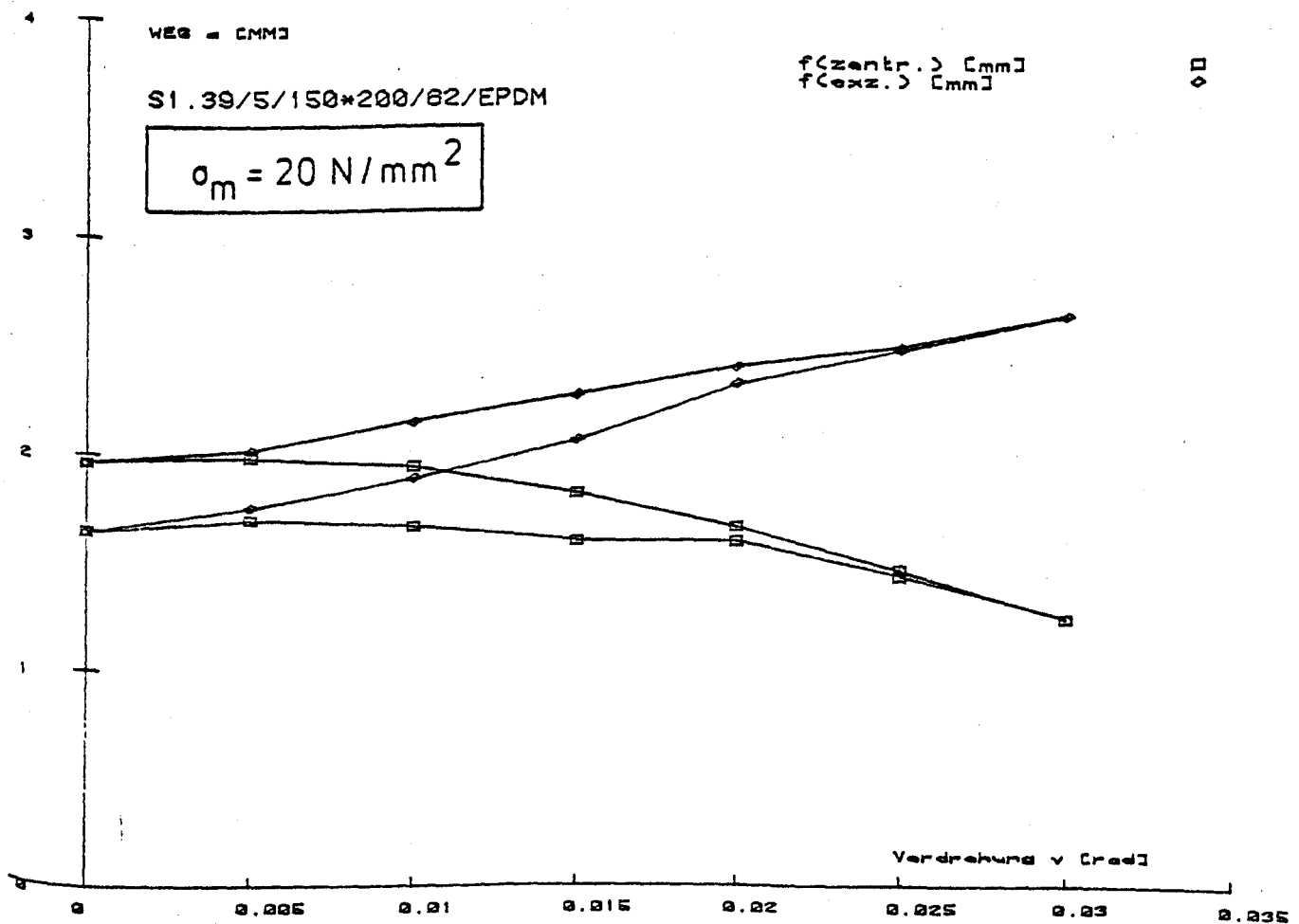


Bild: A 43

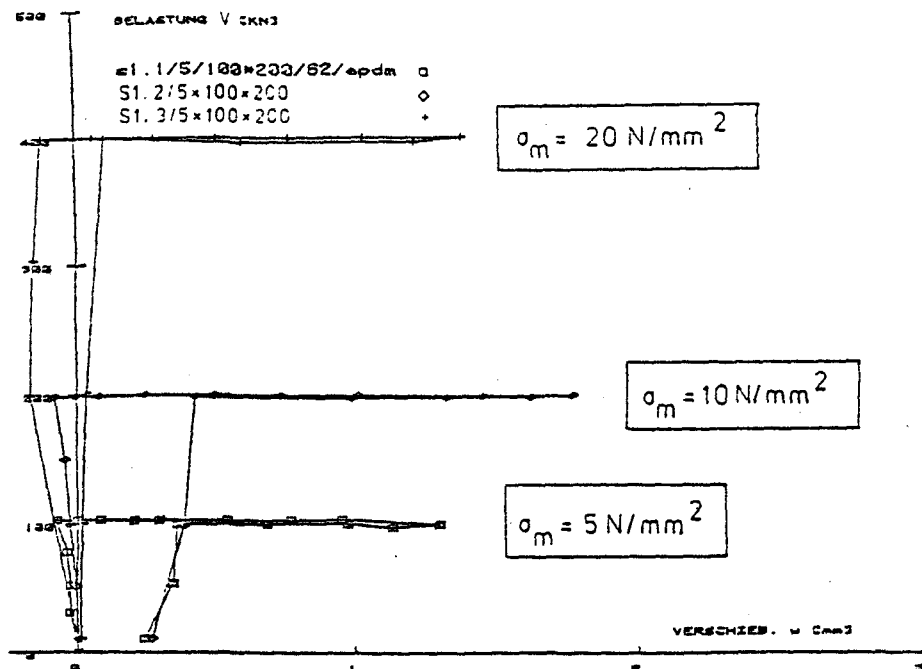


Bild: A 44

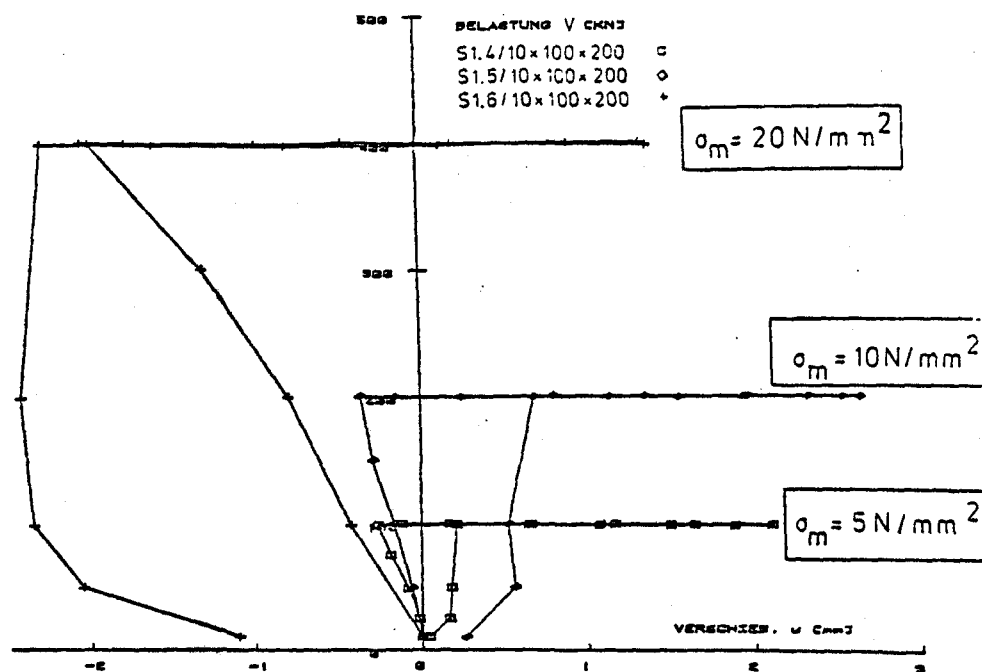


Bild: A 45

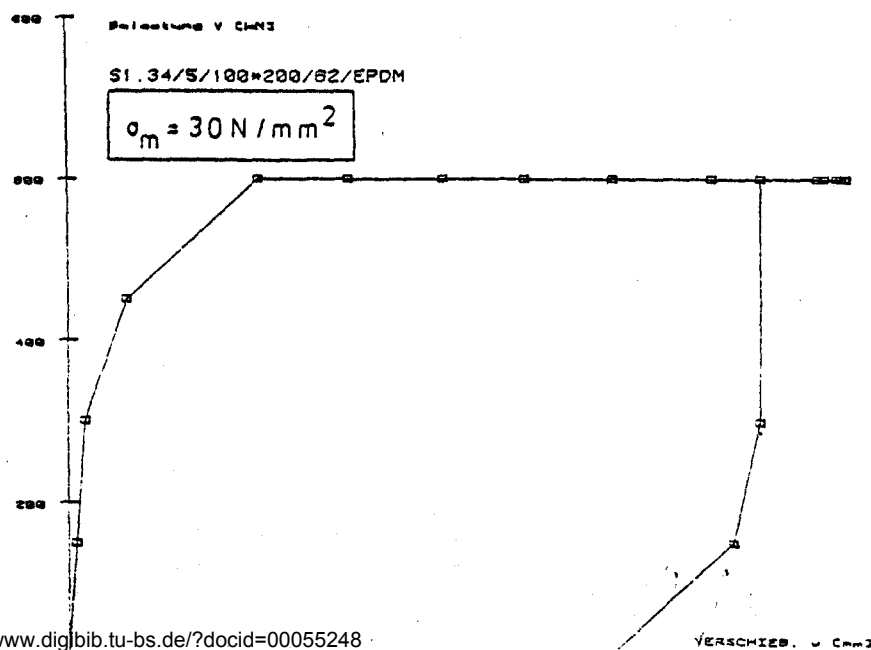


Bild: A 46

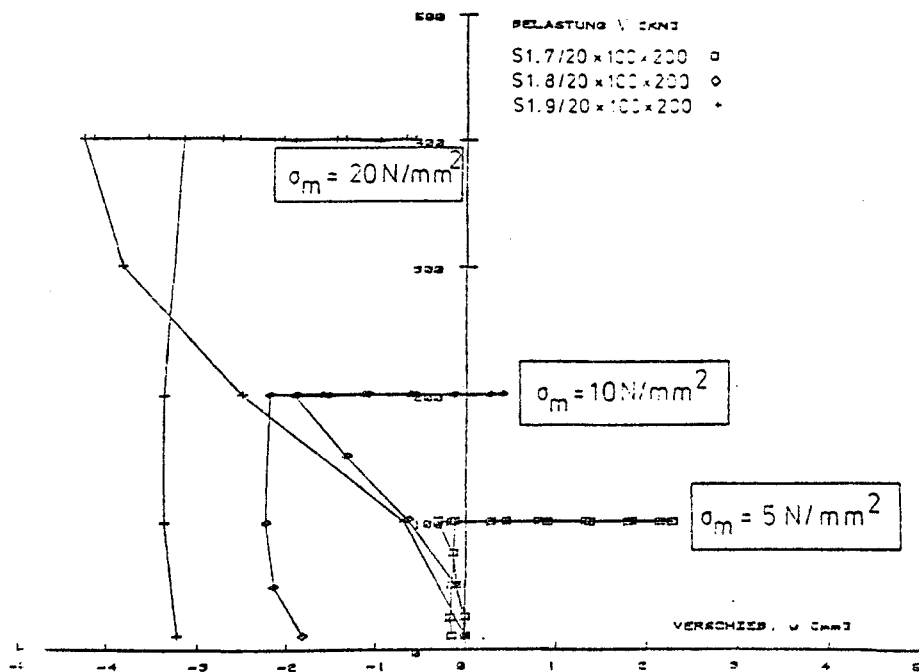


Bild: A 47

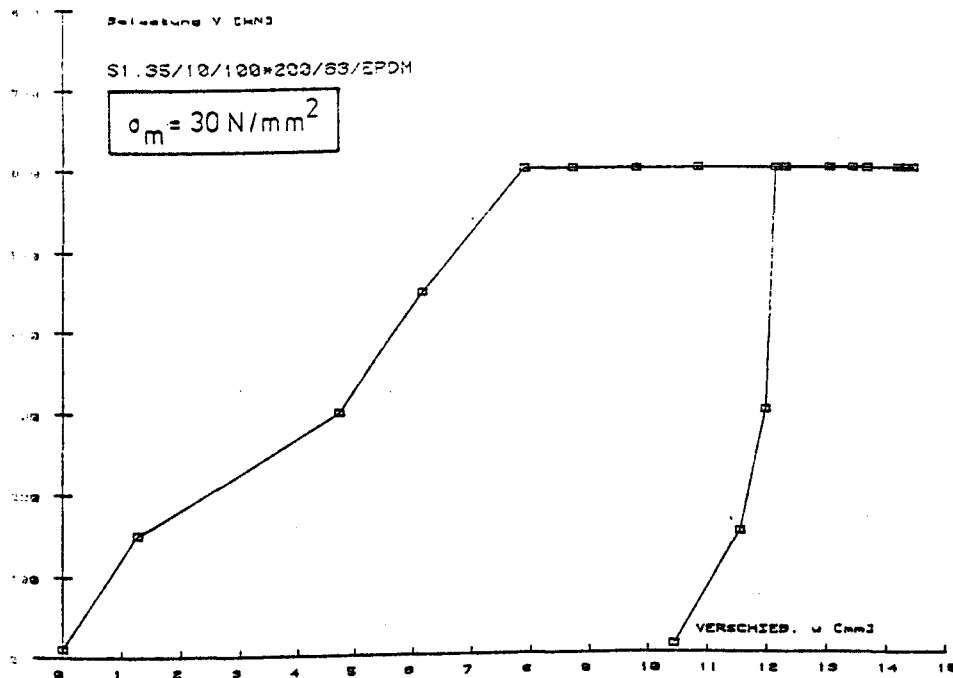


Bild: A 48

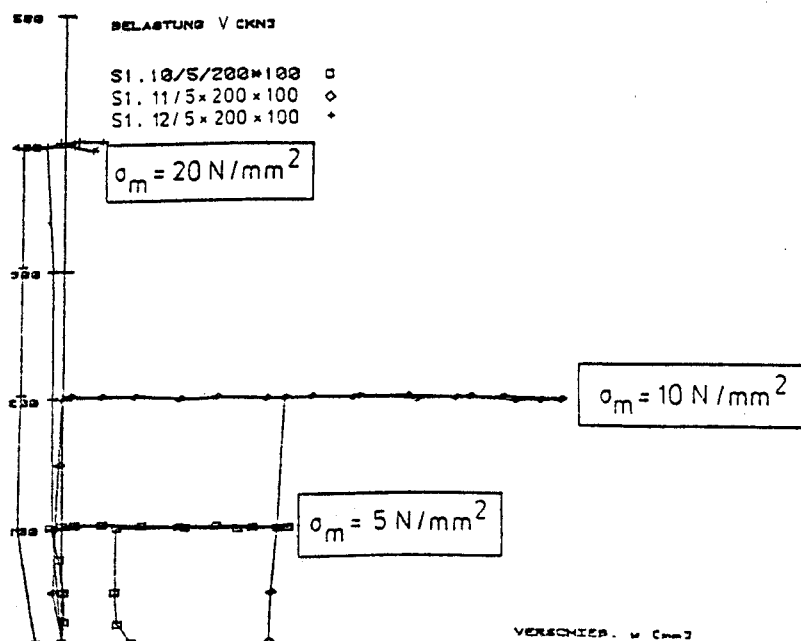


Bild: A 49

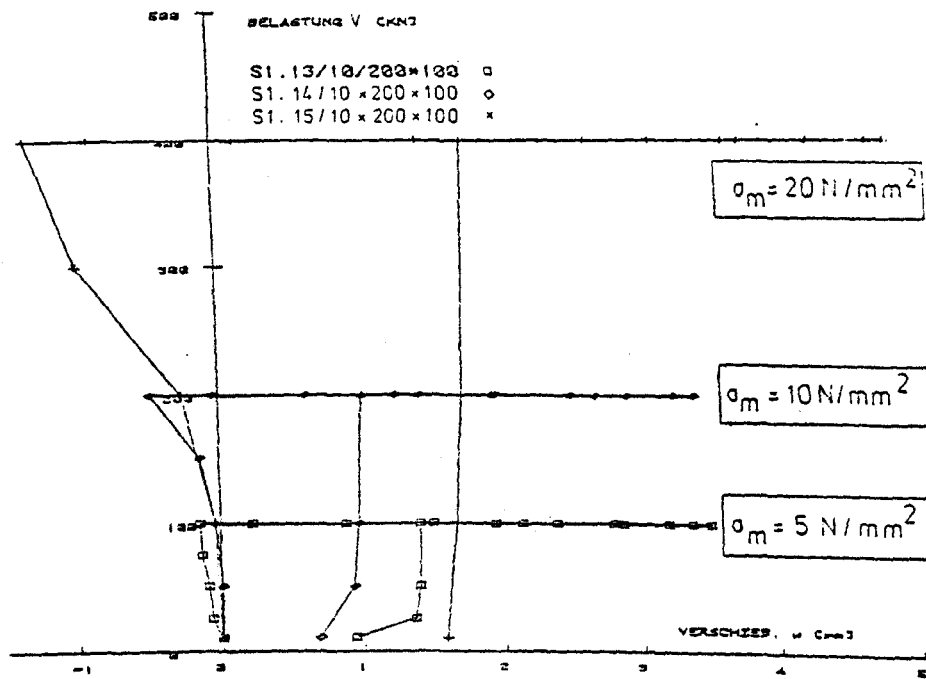


Bild: A 50

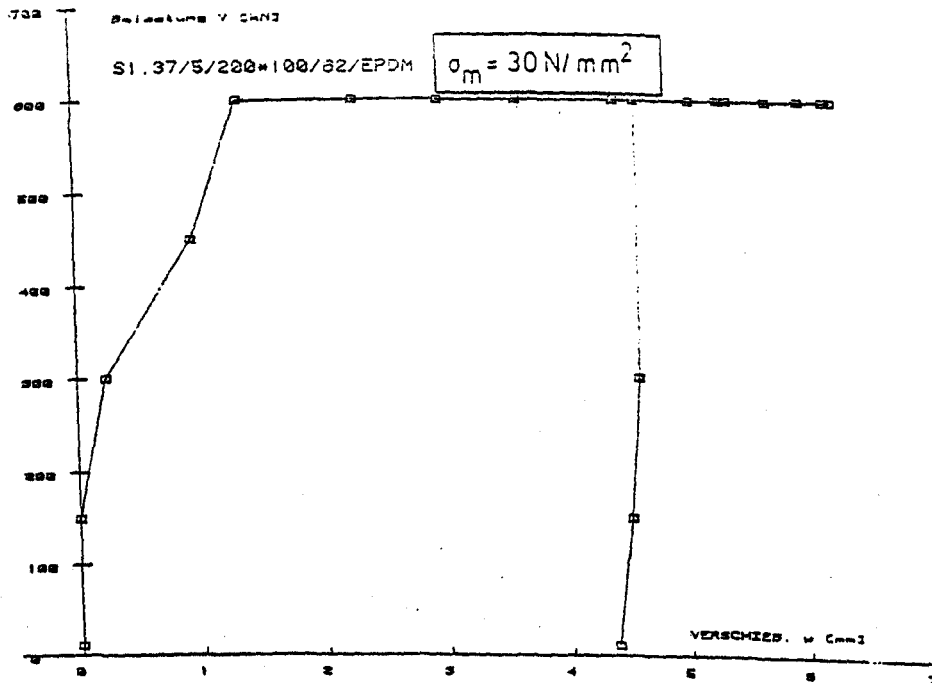


Bild: A 51

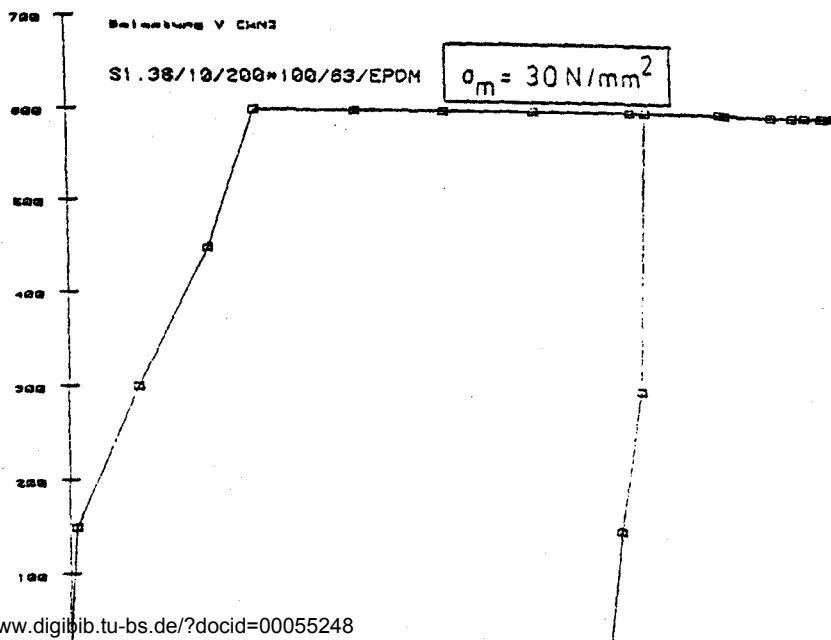


Bild: A 52

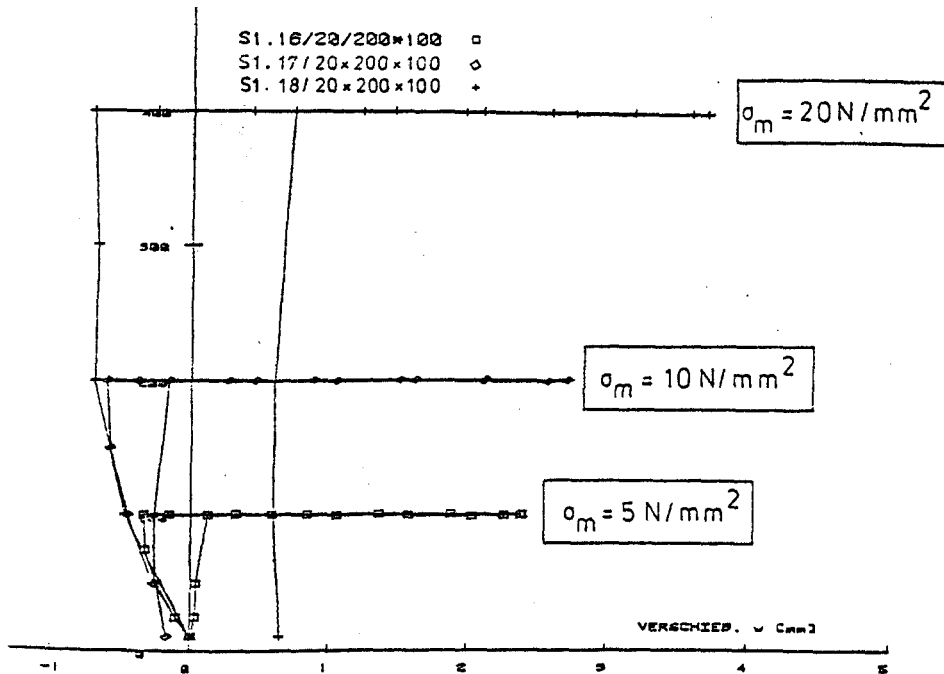


Bild: A 53

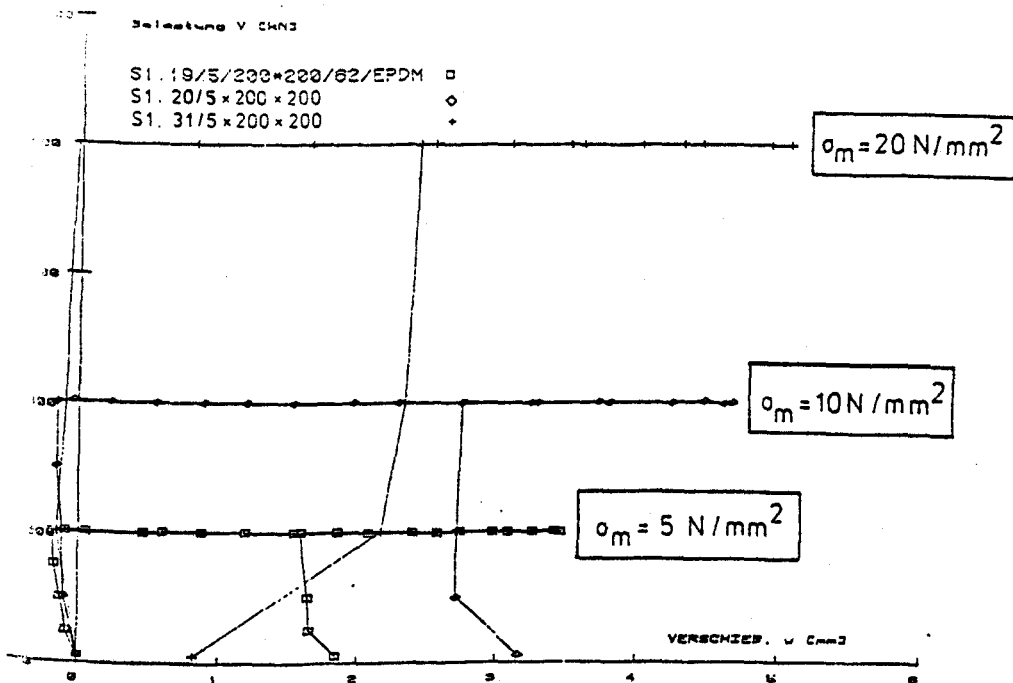


Bild: A 54

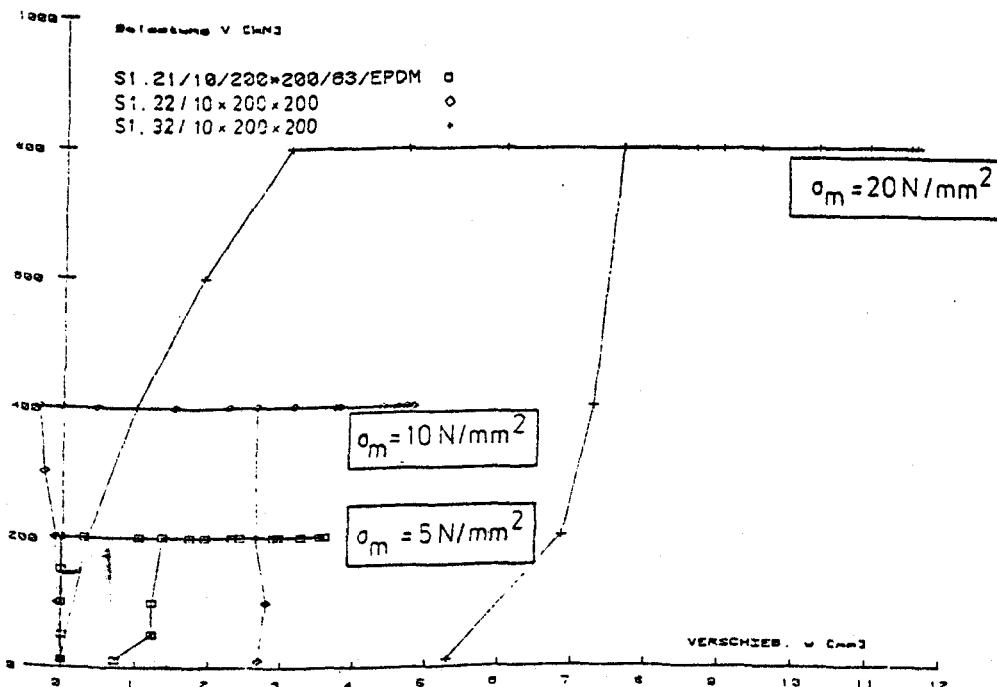


Bild: A 55

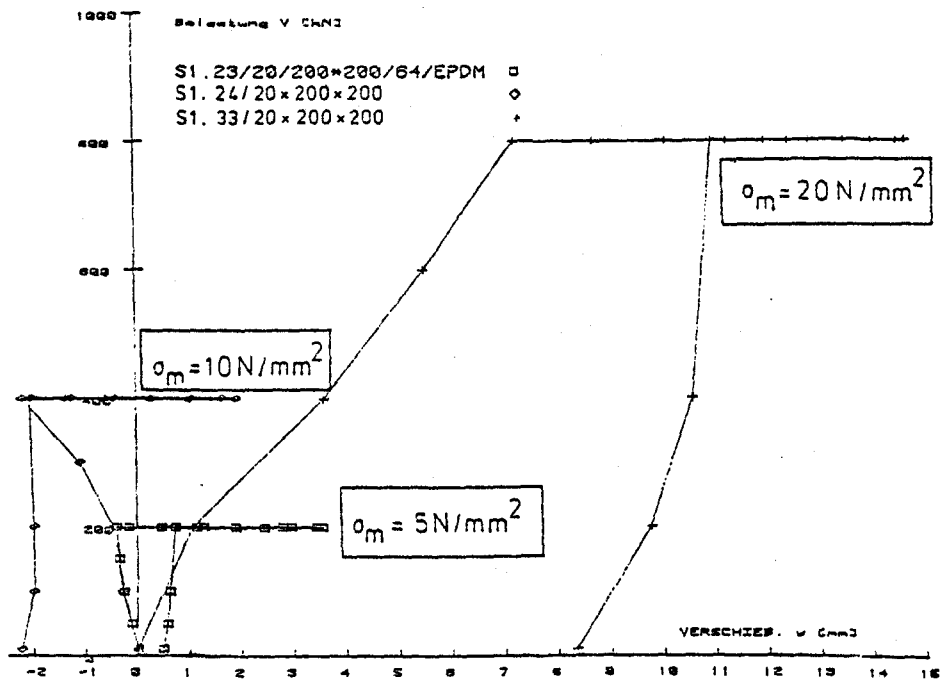


Bild: A 56

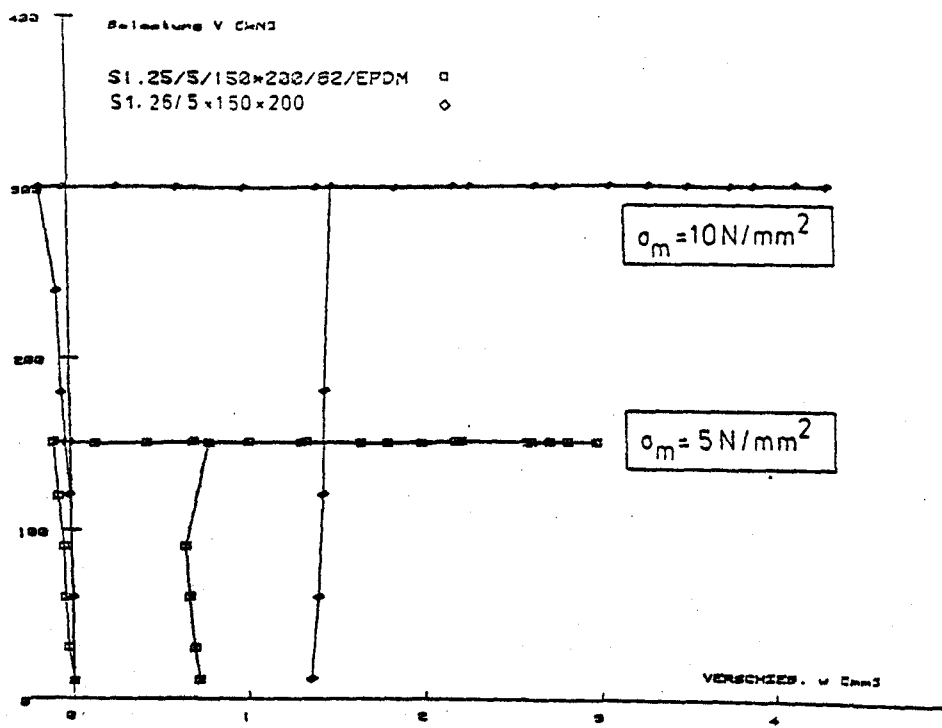


Bild: A 57

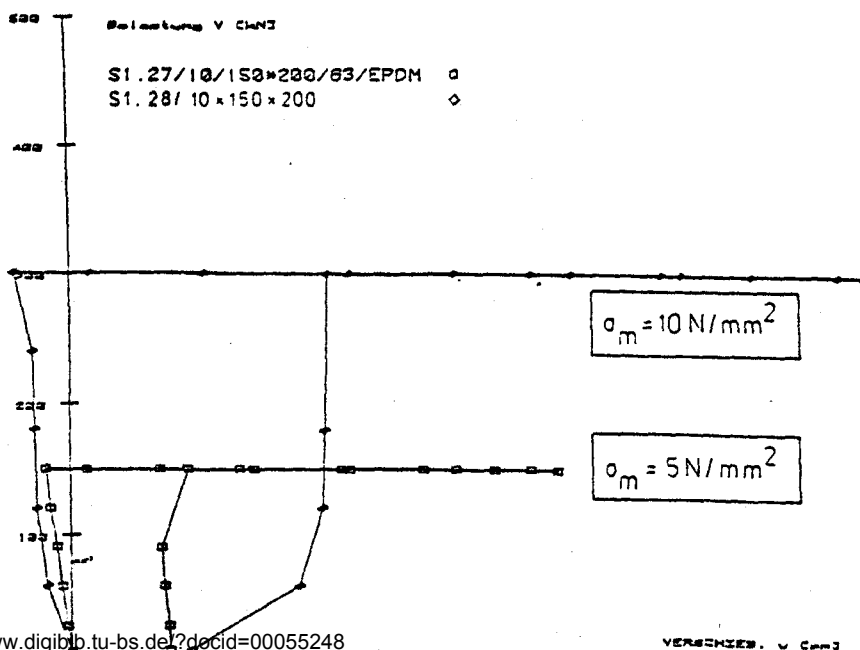


Bild: A 58

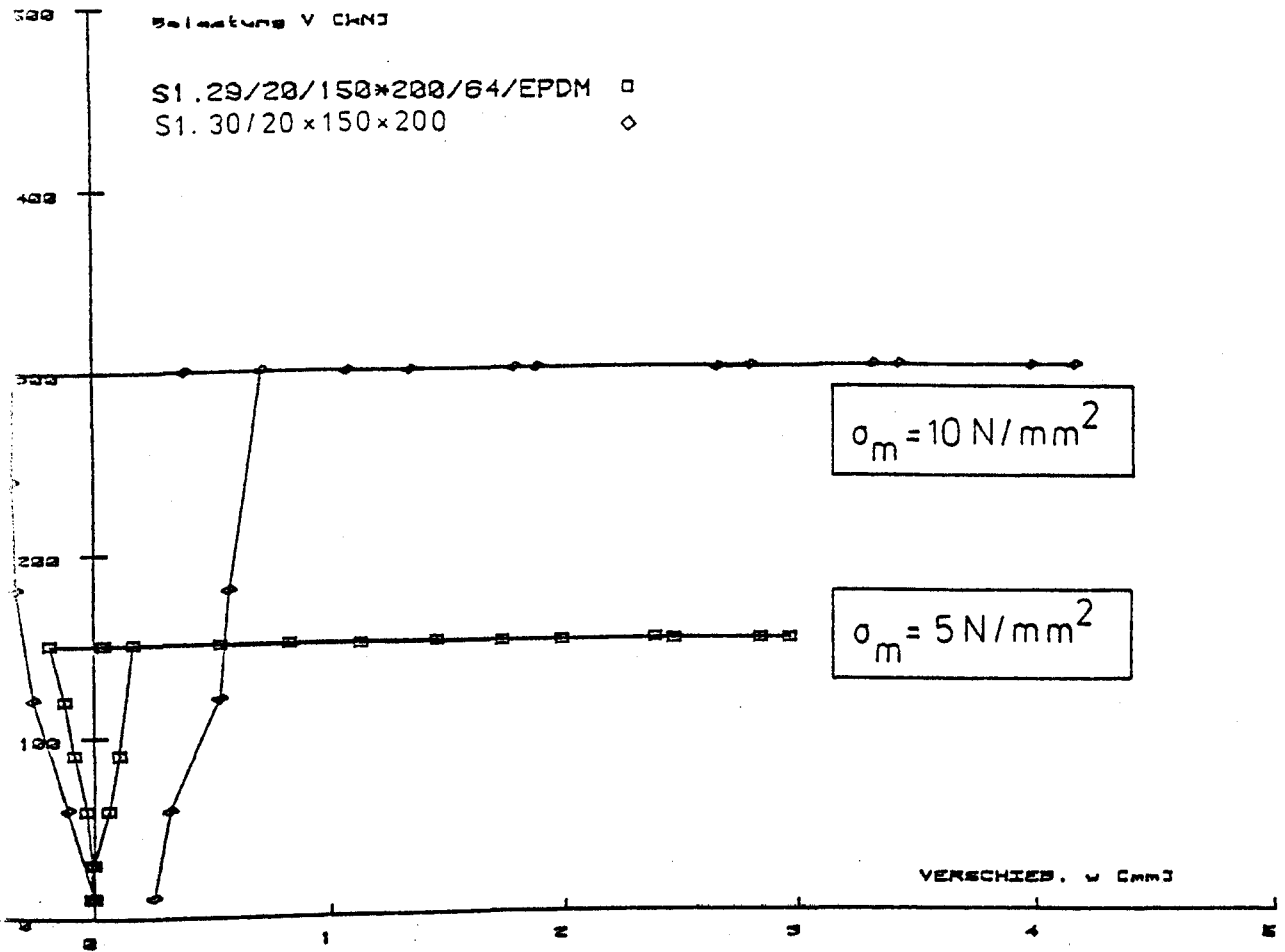
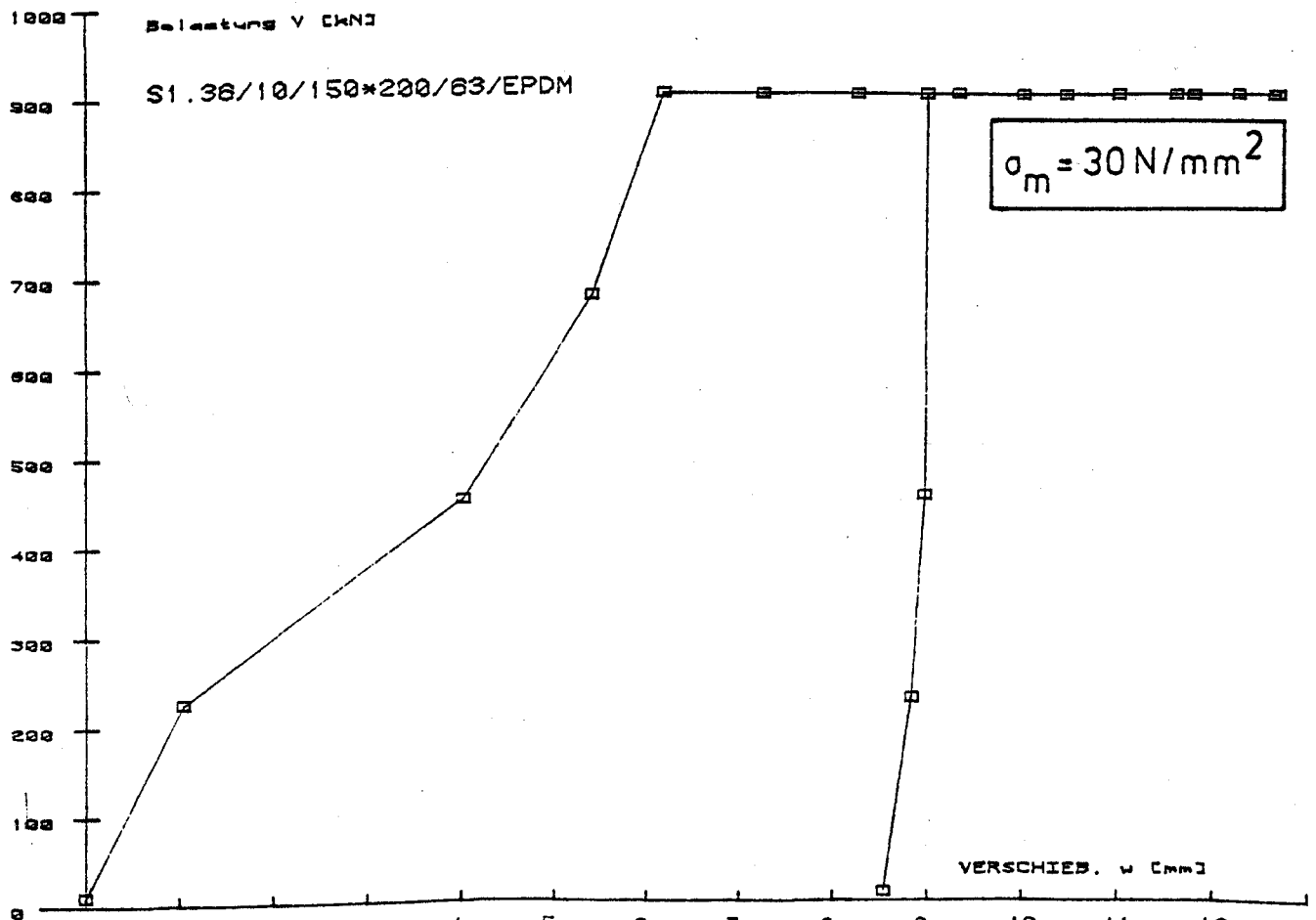


Bild: A 59



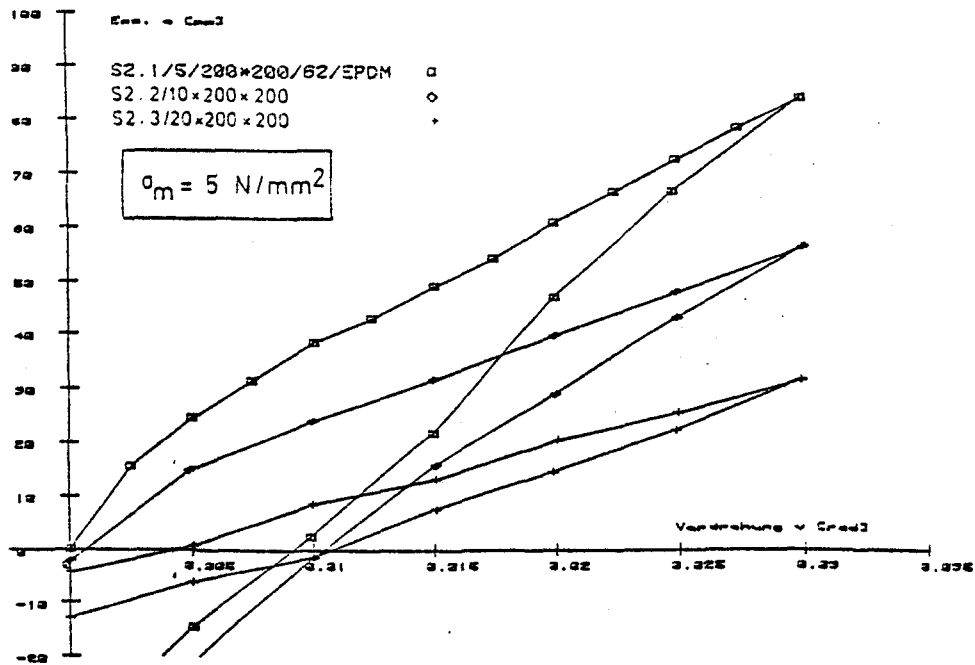


Bild: A 61

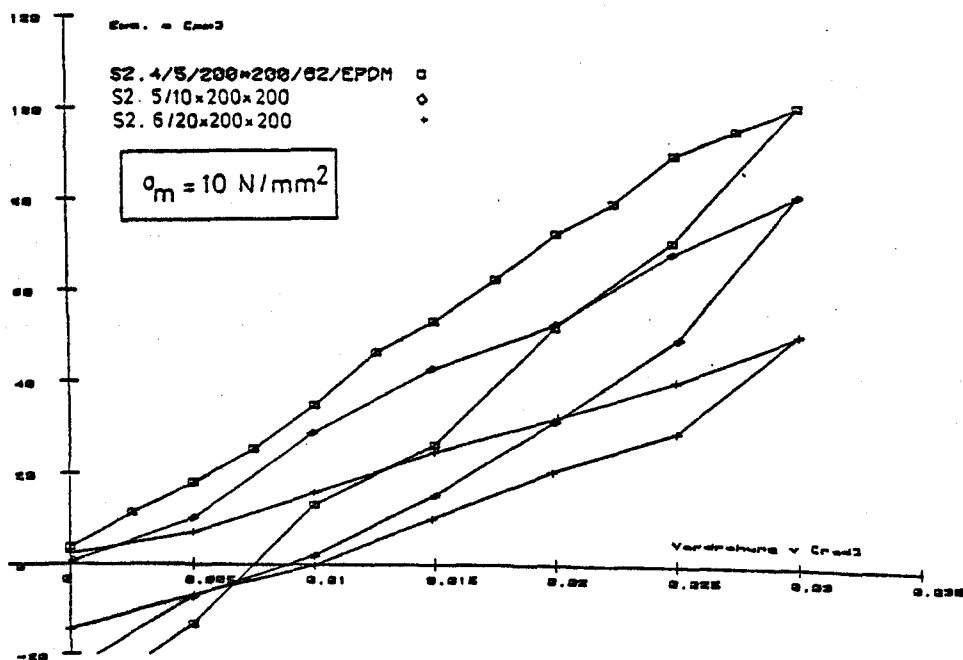


Bild: A 62

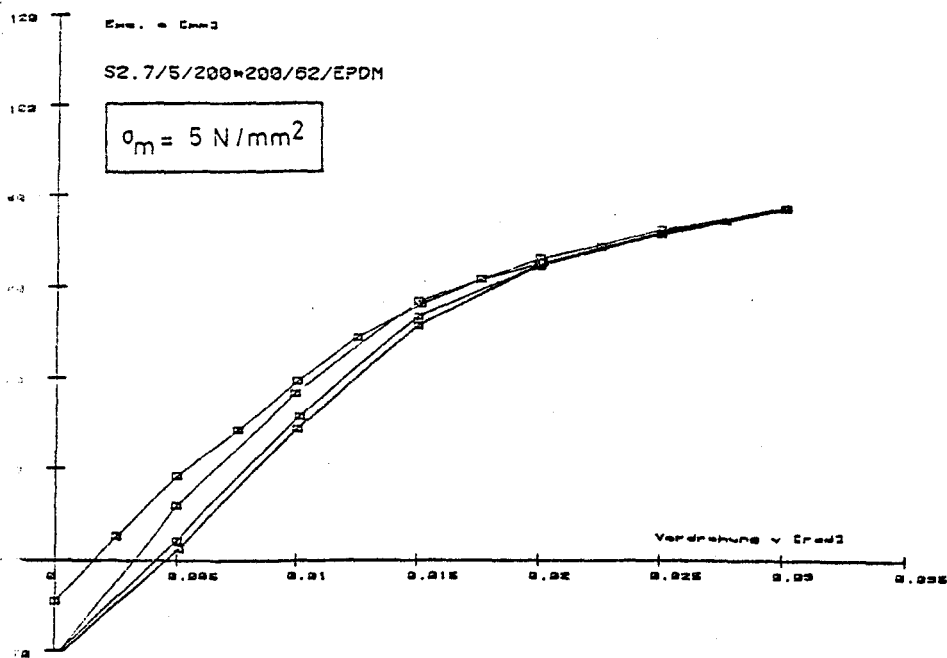


Bild: A 63

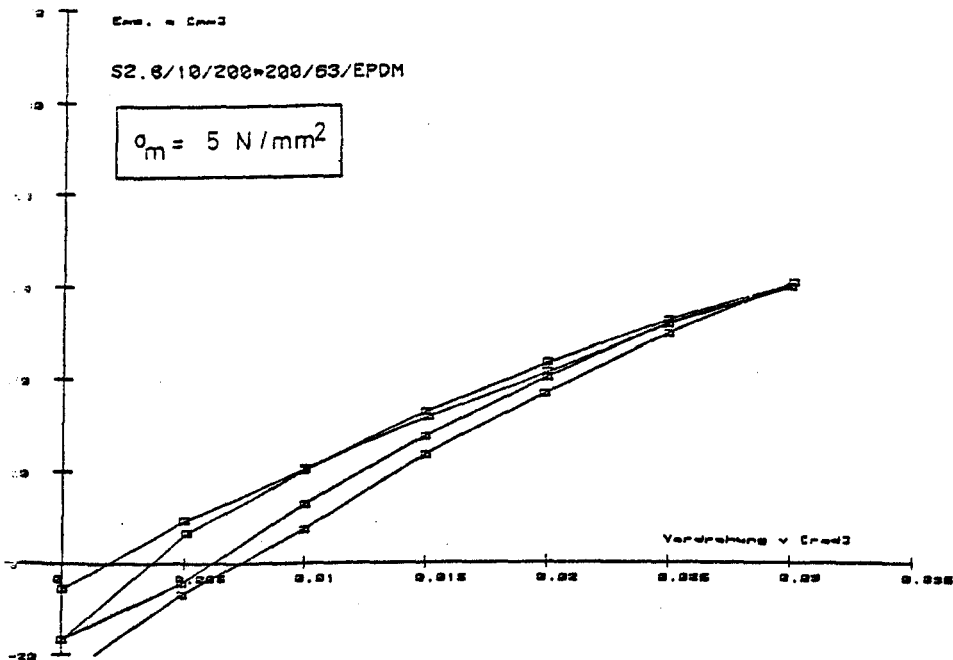


Bild: A 64

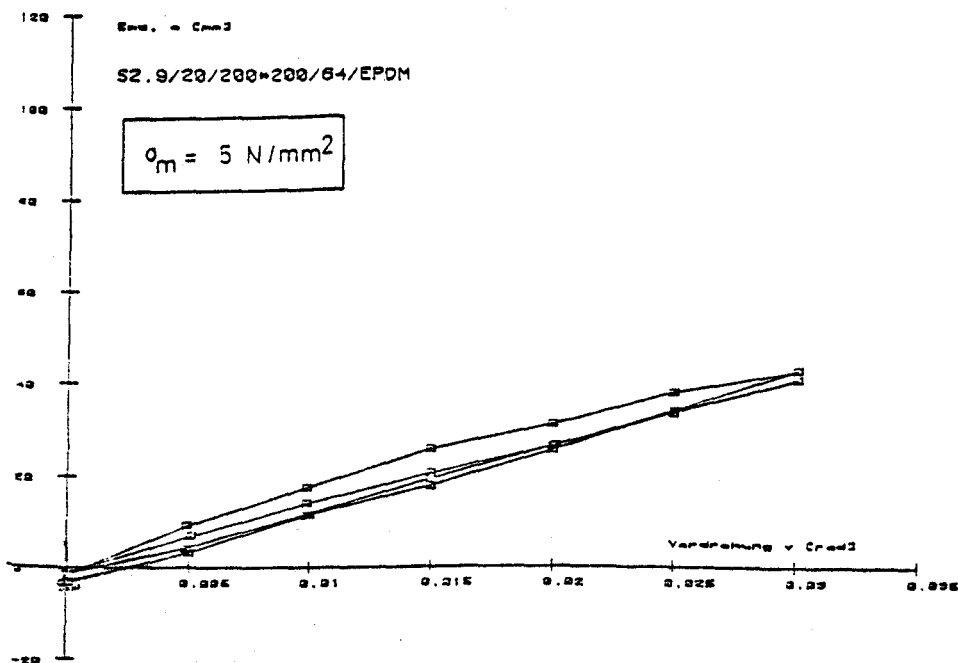


Bild: A 65

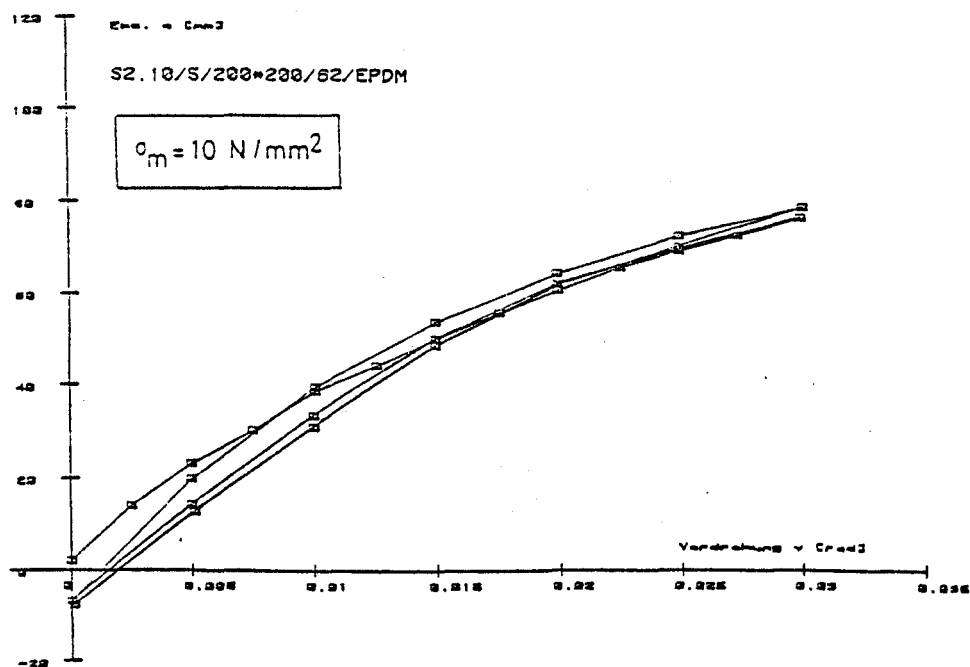


Bild: A 66

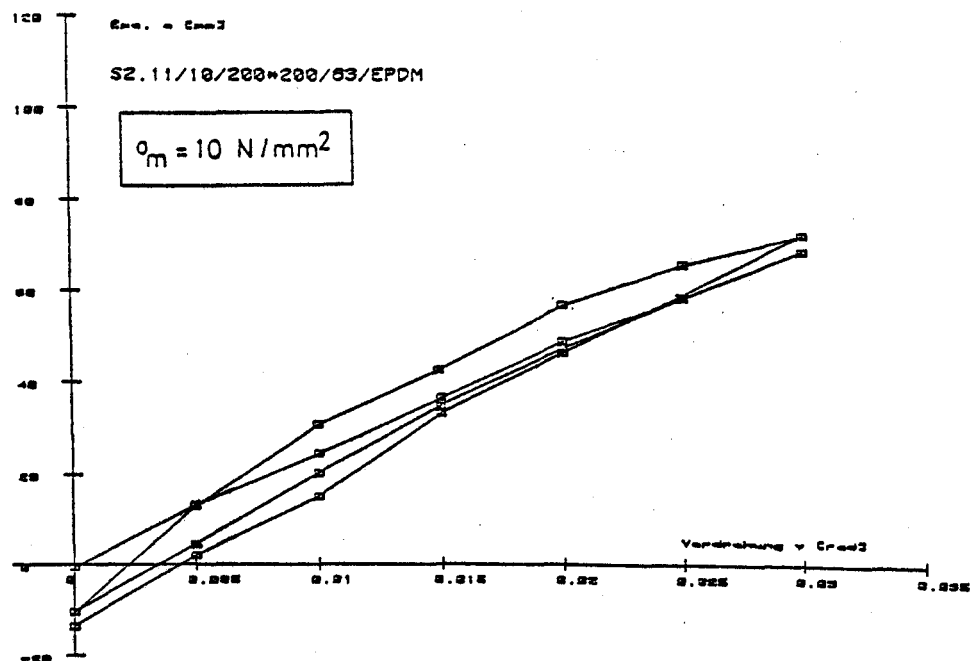


Bild: A 67

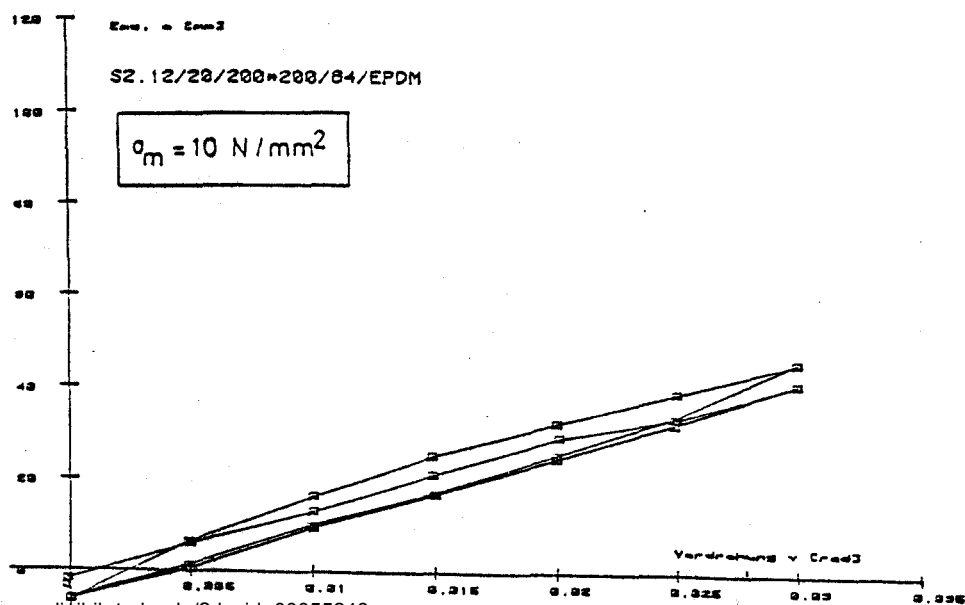


Bild: A 68

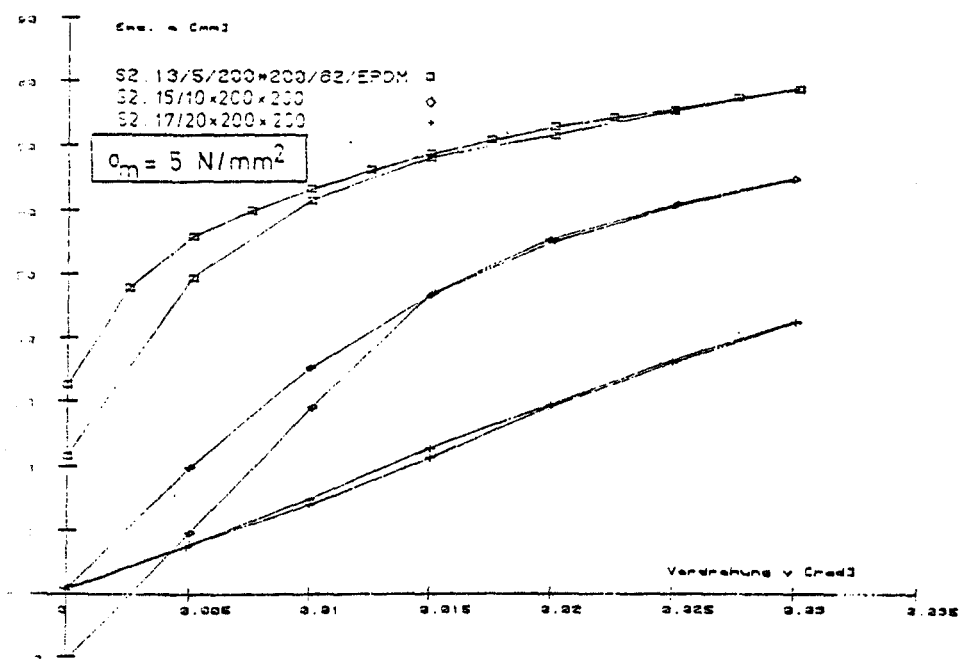


Bild: A 69

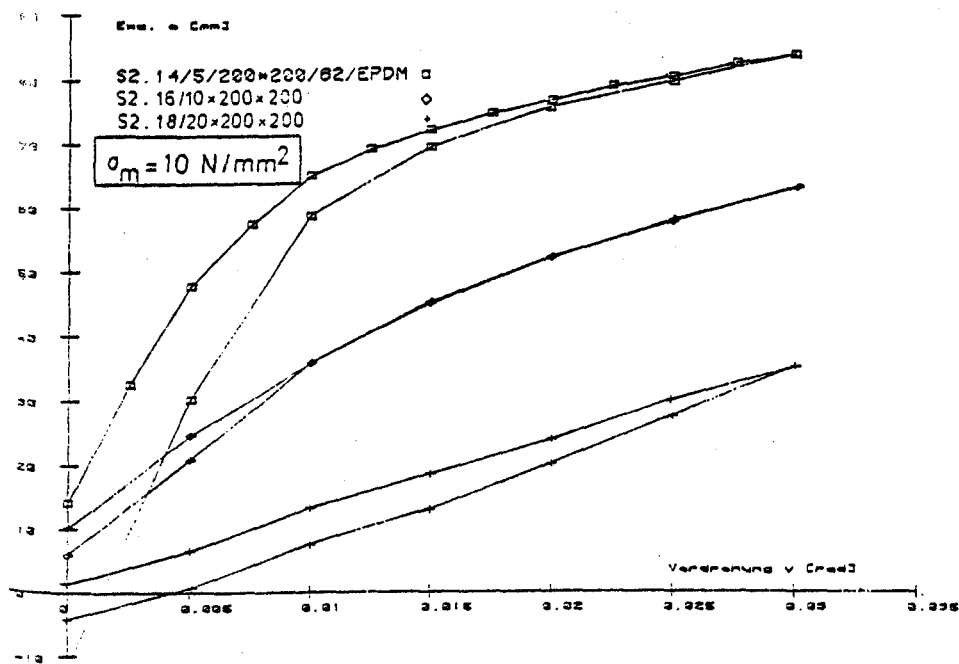


Bild: A 70

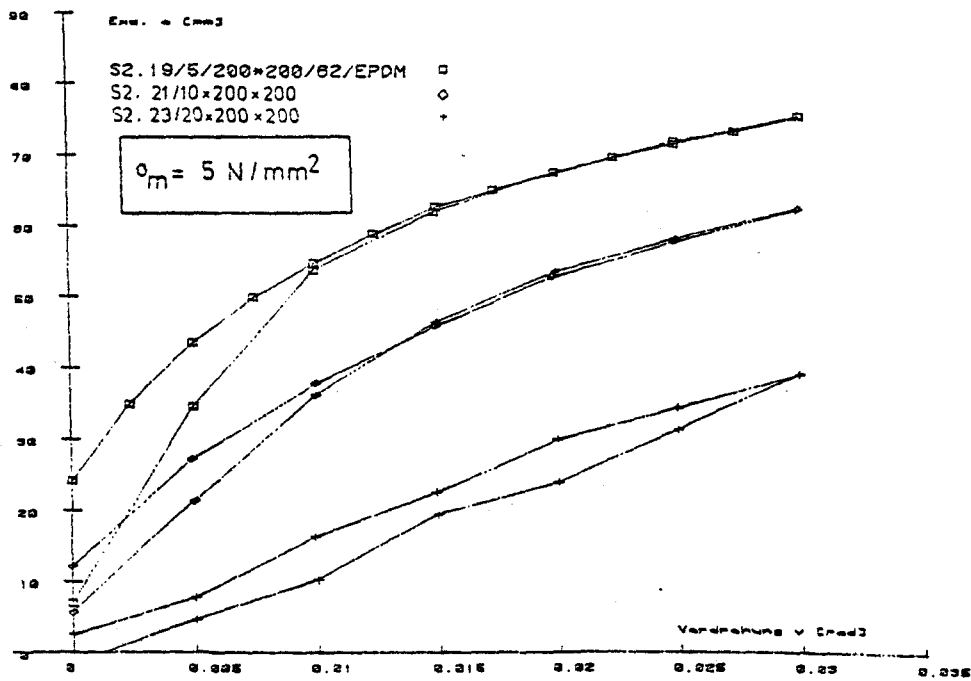


Bild: A 71

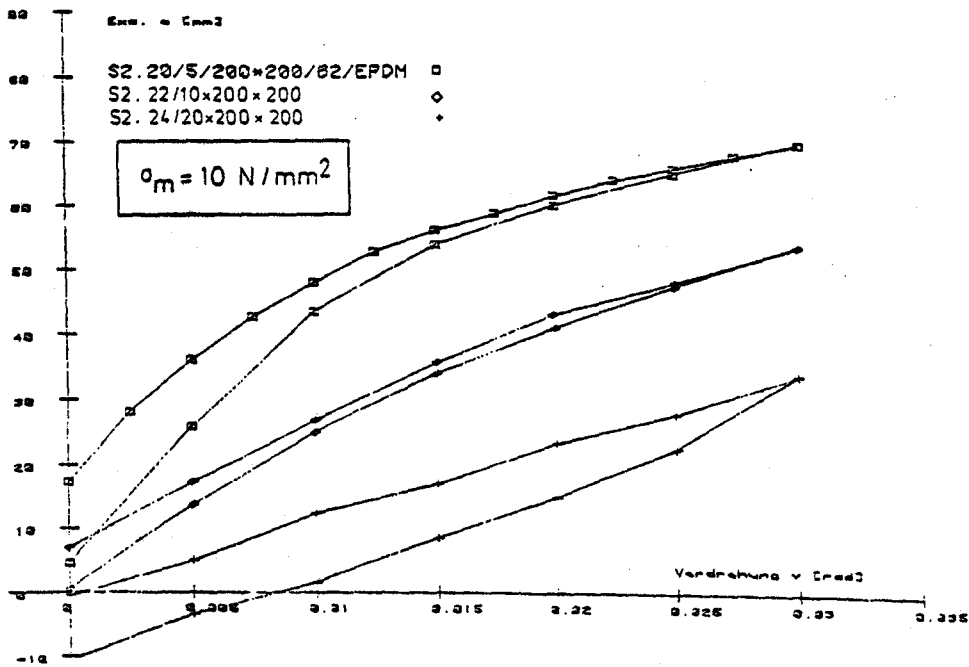


Bild: A 72

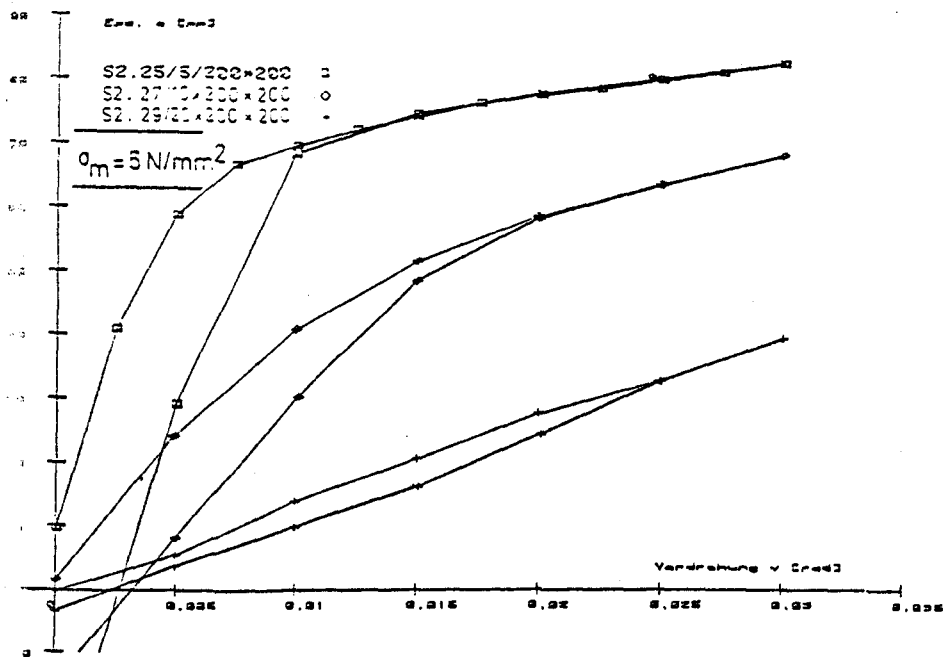


Bild: A 73

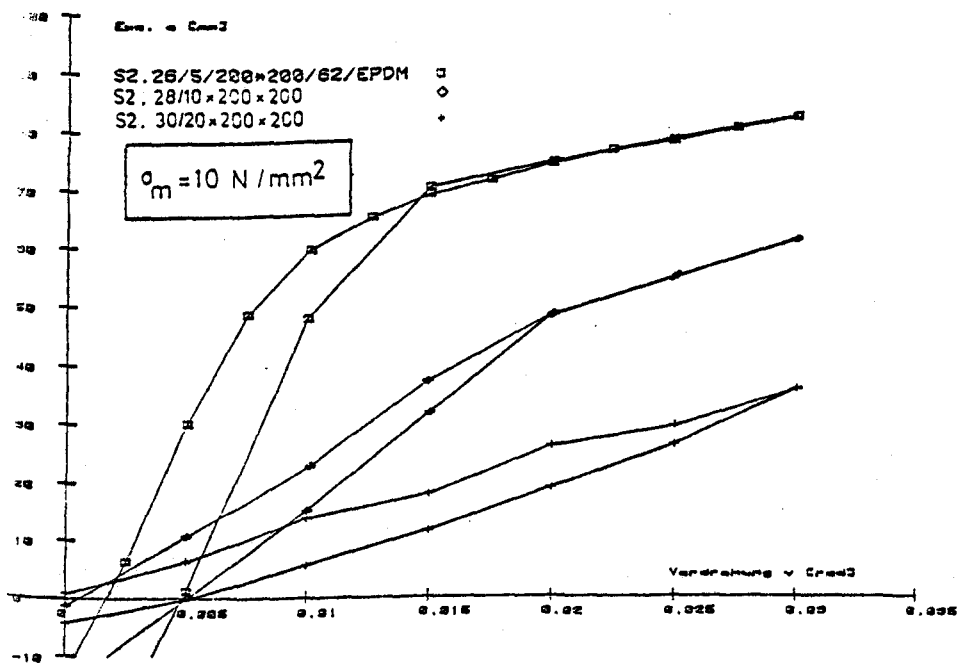


Bild: A 74

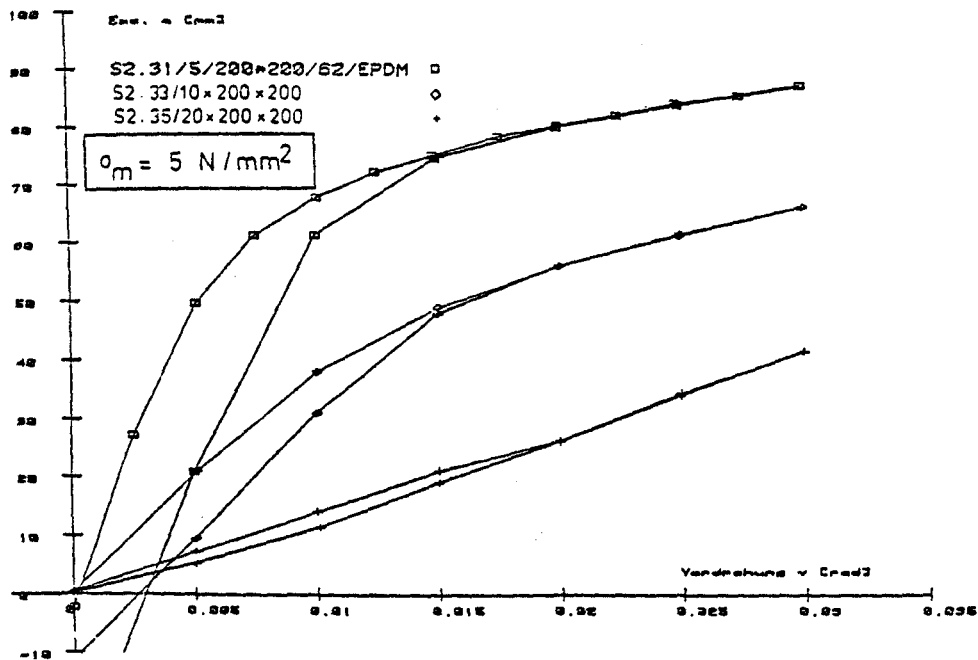


Bild: A 75

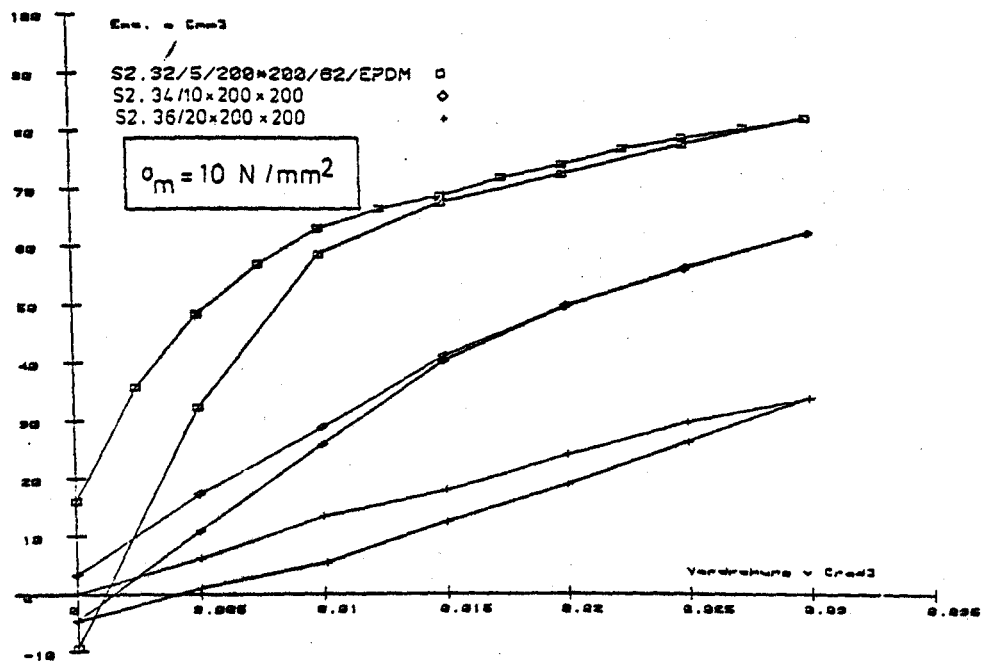


Bild: A 76

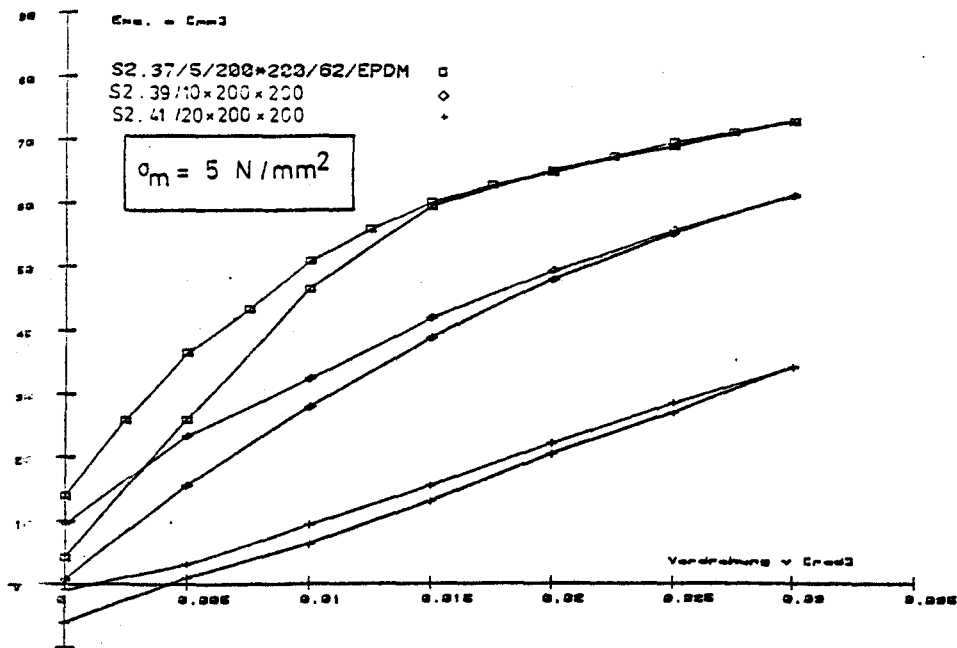


Bild: A 77

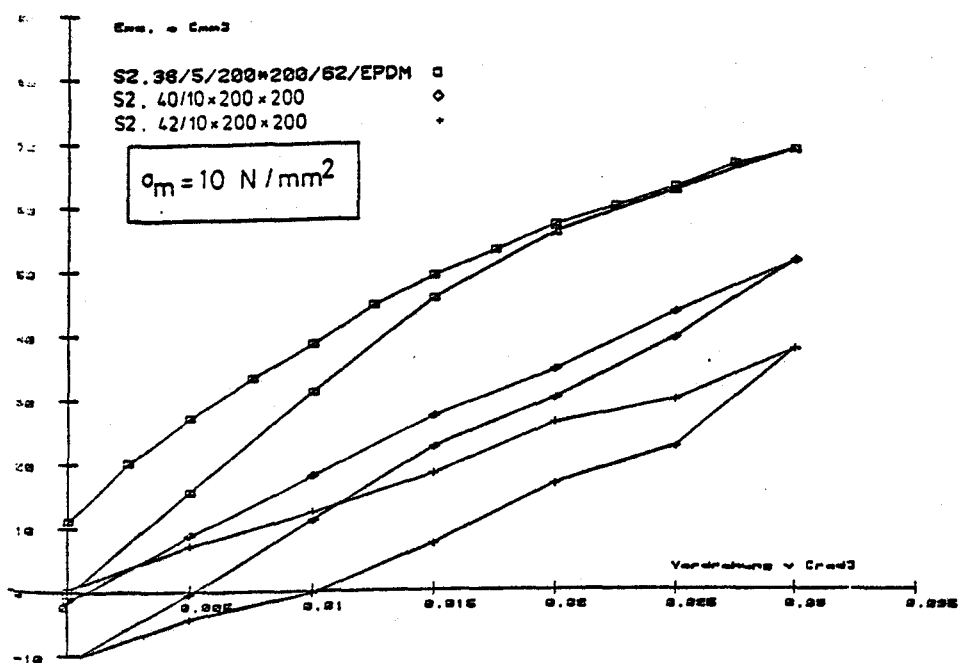


Bild: A 78

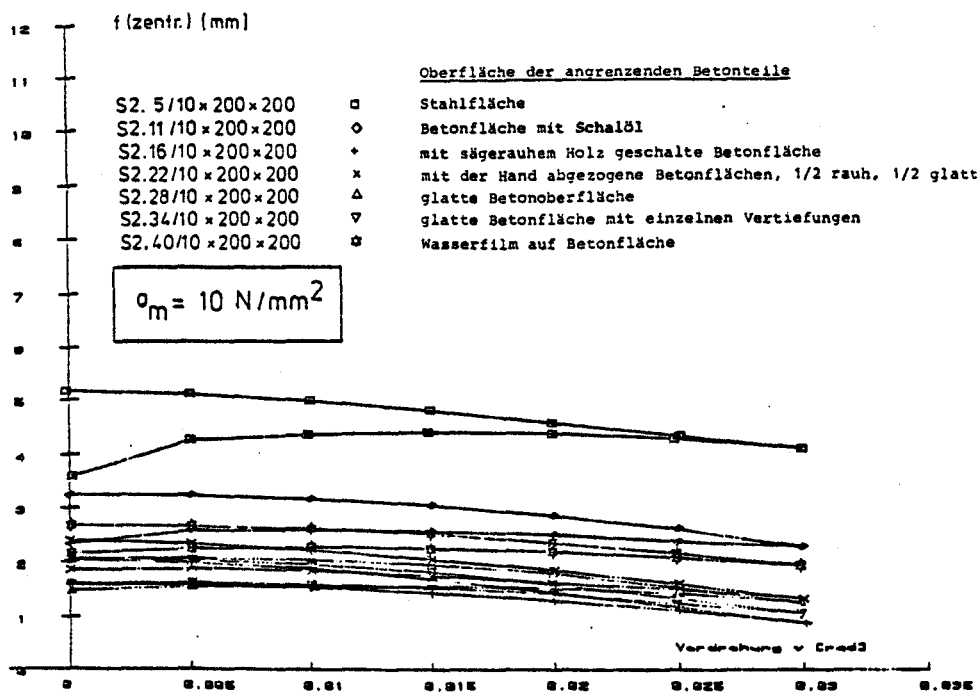


Bild: A 79

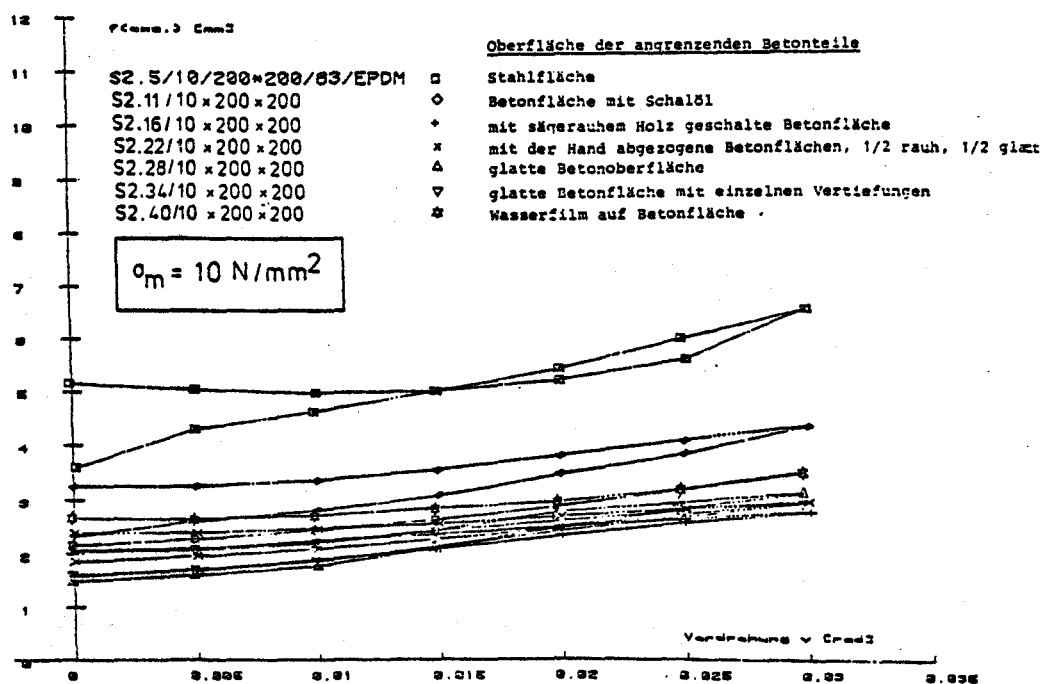


Bild: A 80

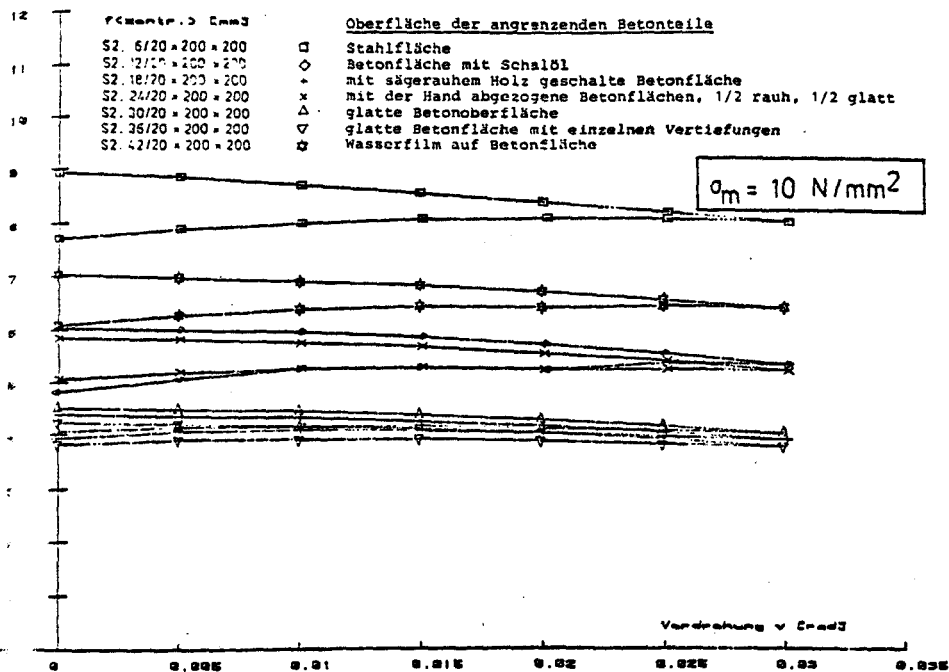


Bild: A 81

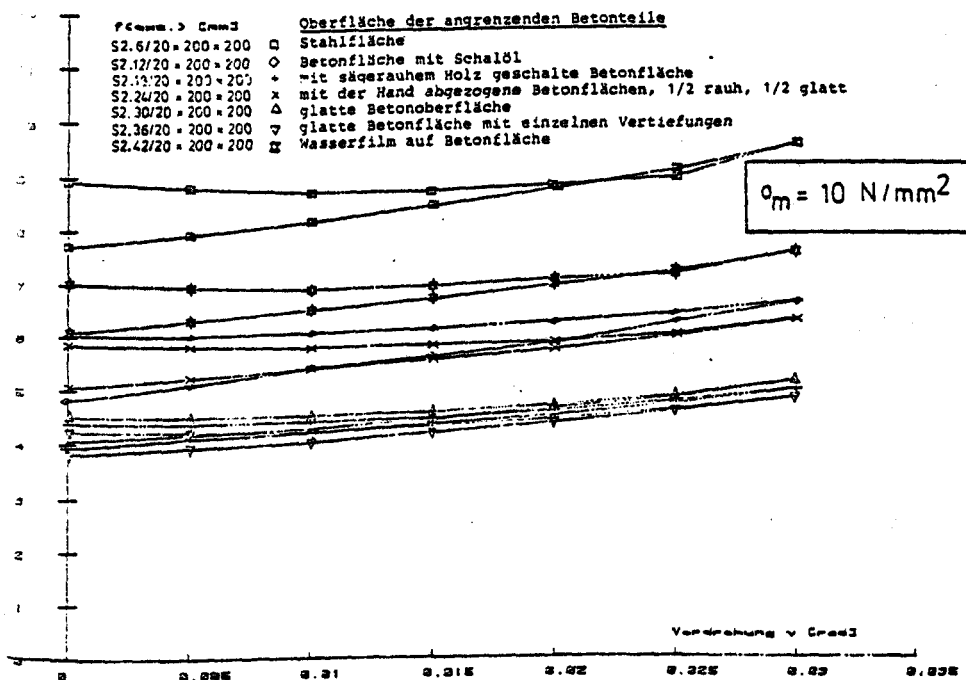


Bild: A 82

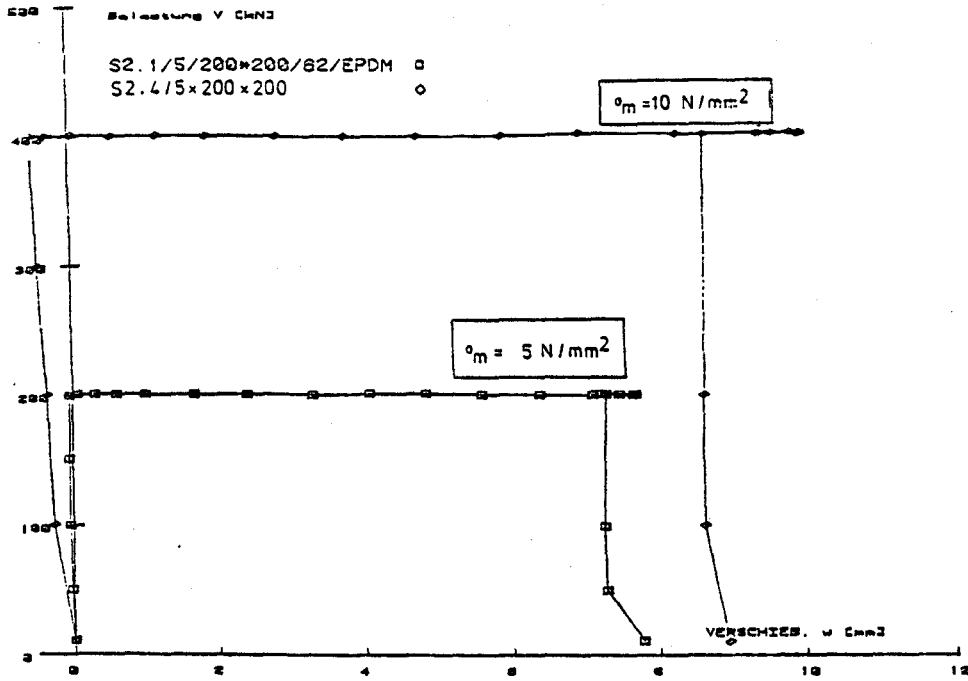


Bild: A 83

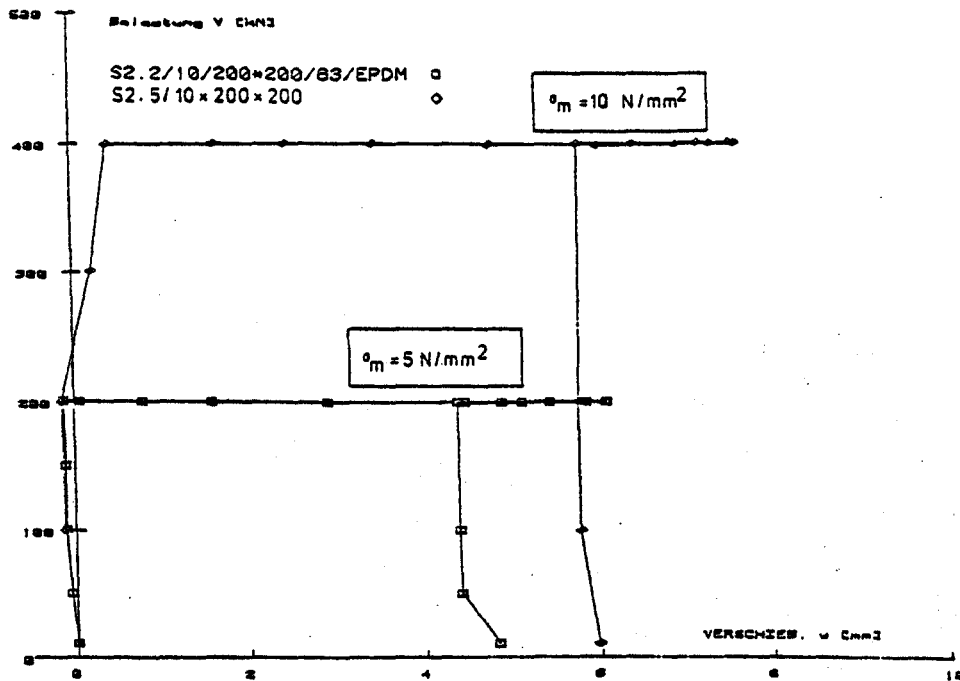


Bild: A 84

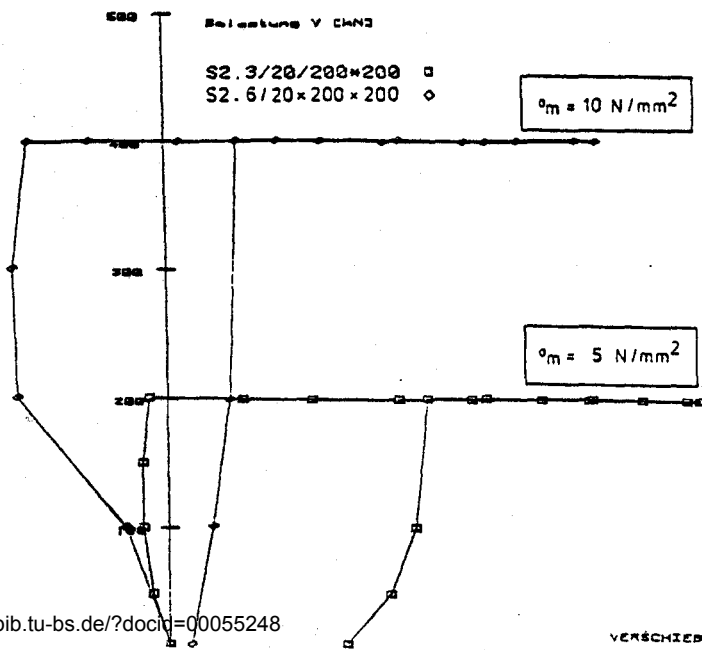


Bild: A 85

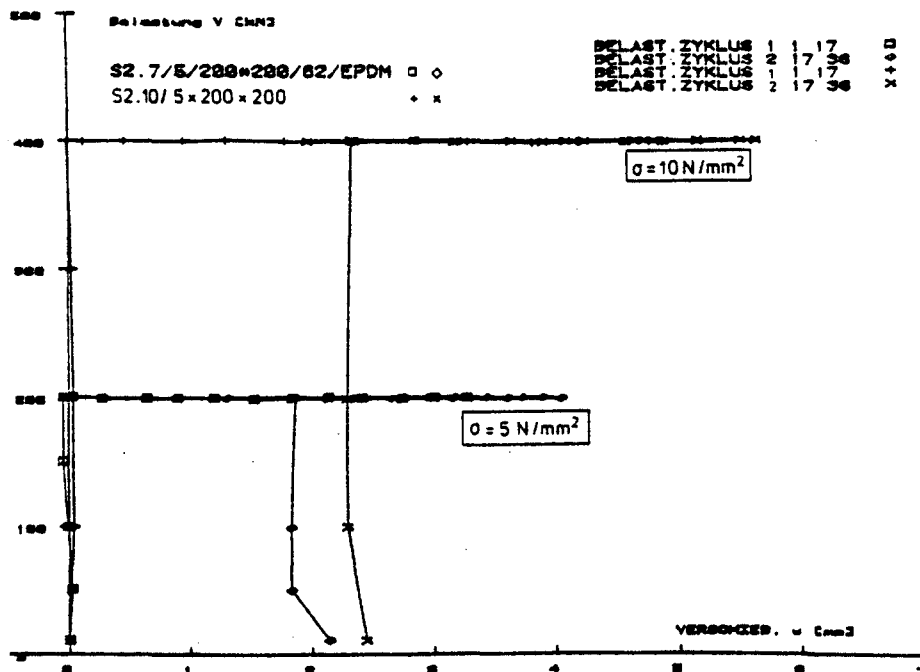


Bild: A 86

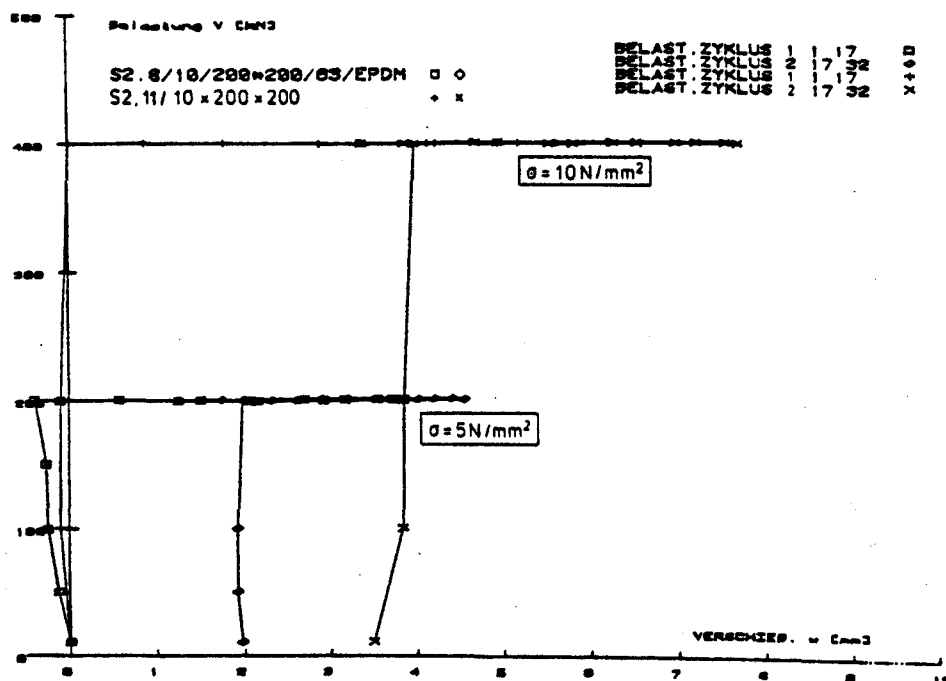


Bild: A 87

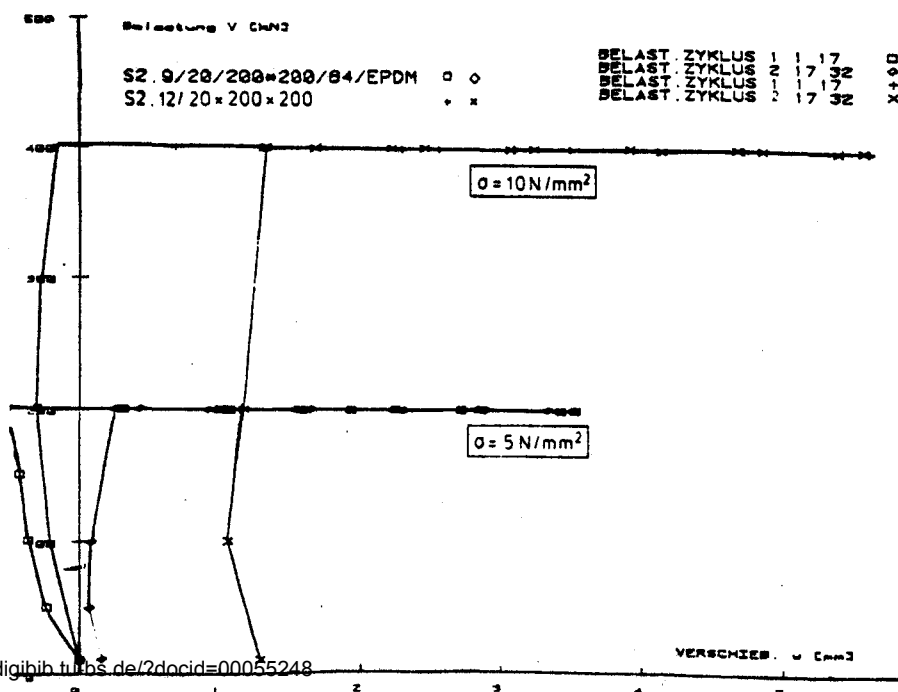


Bild: A 88

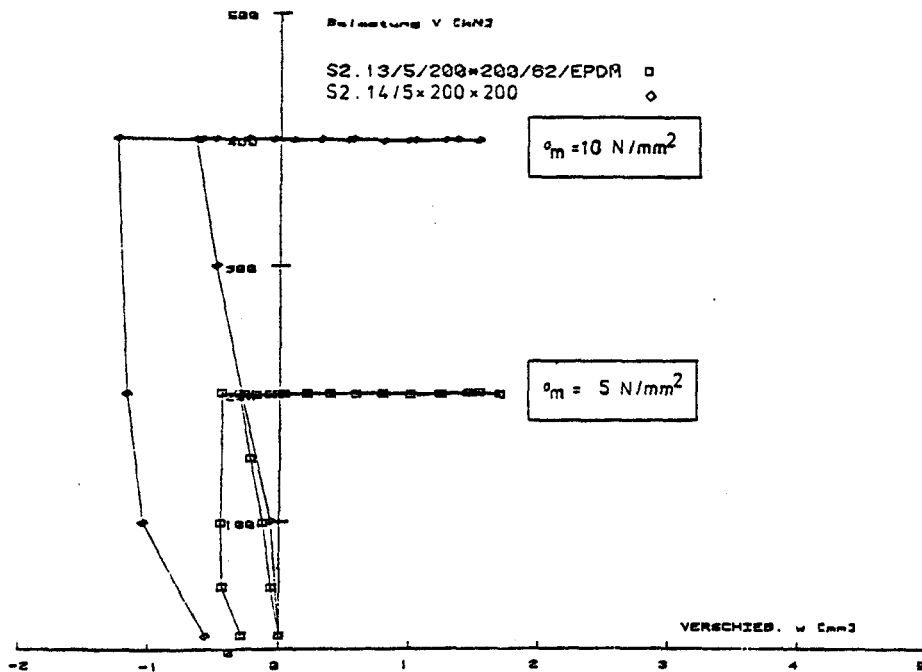


Bild: A 89

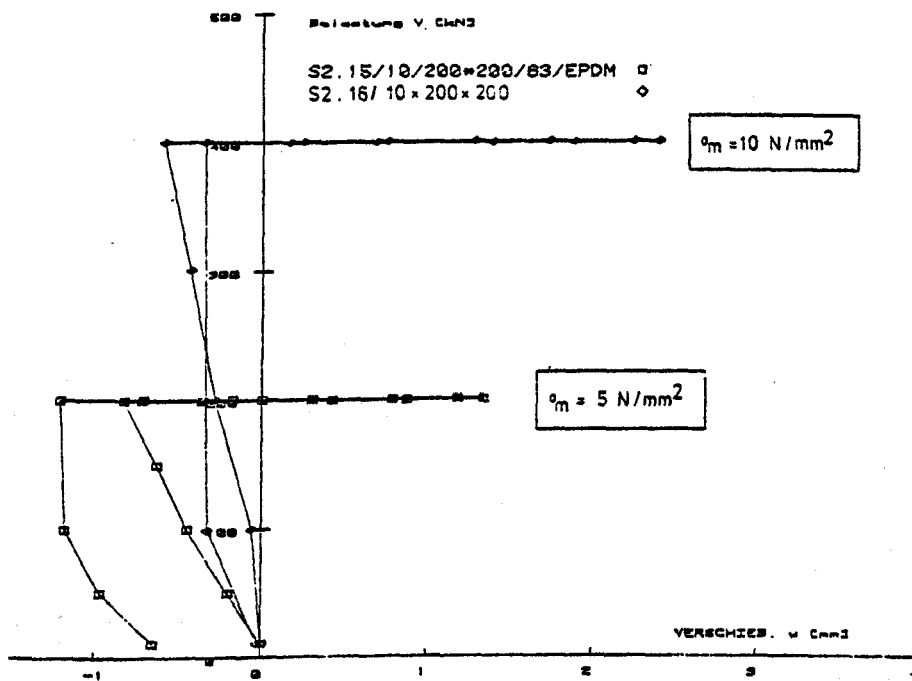


Bild: A 90

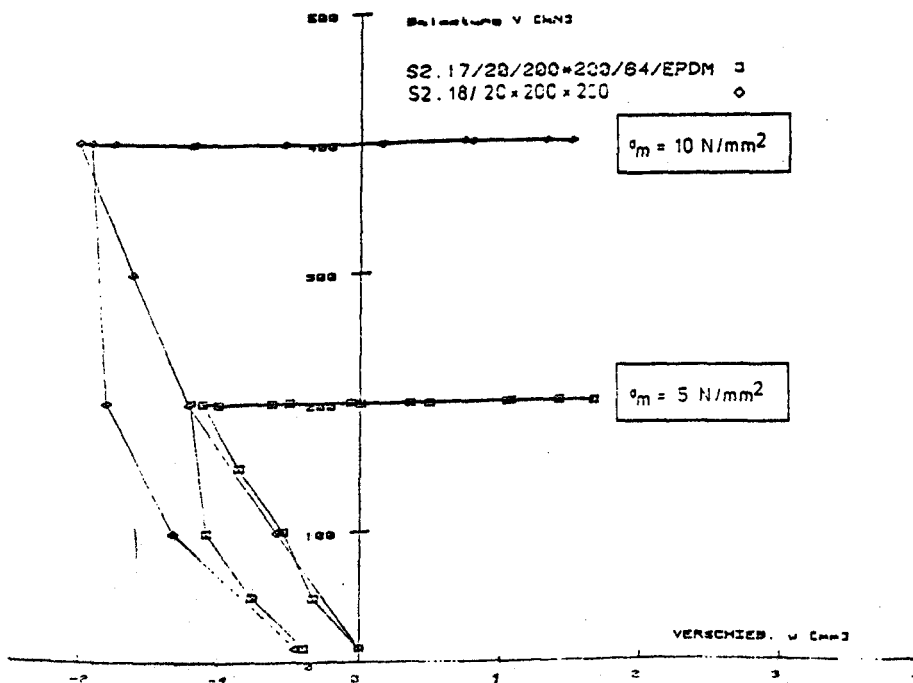


Bild: A 91

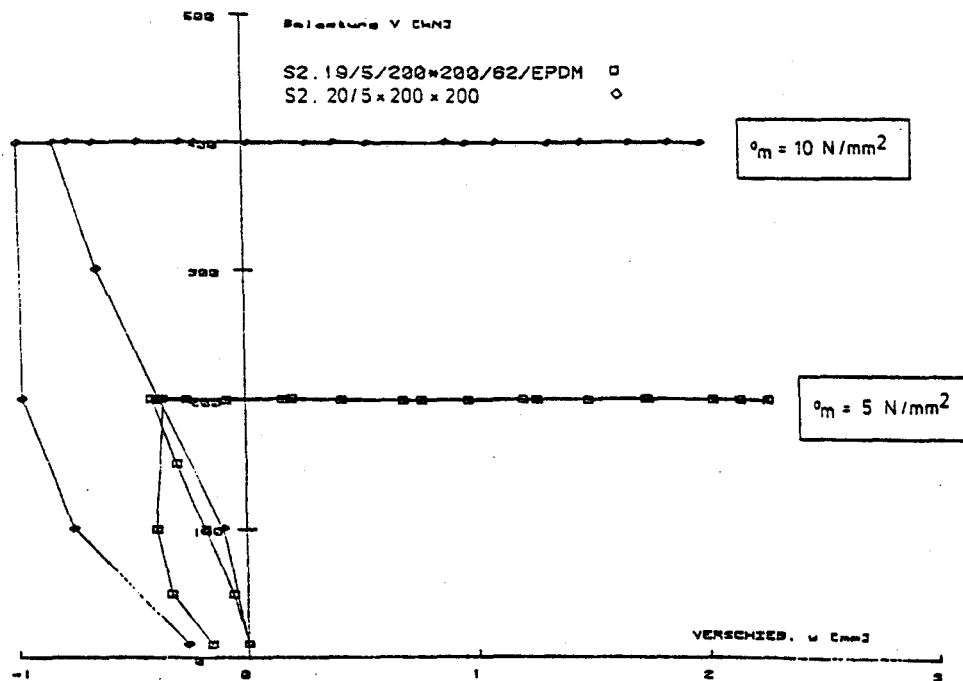


Bild: A 92

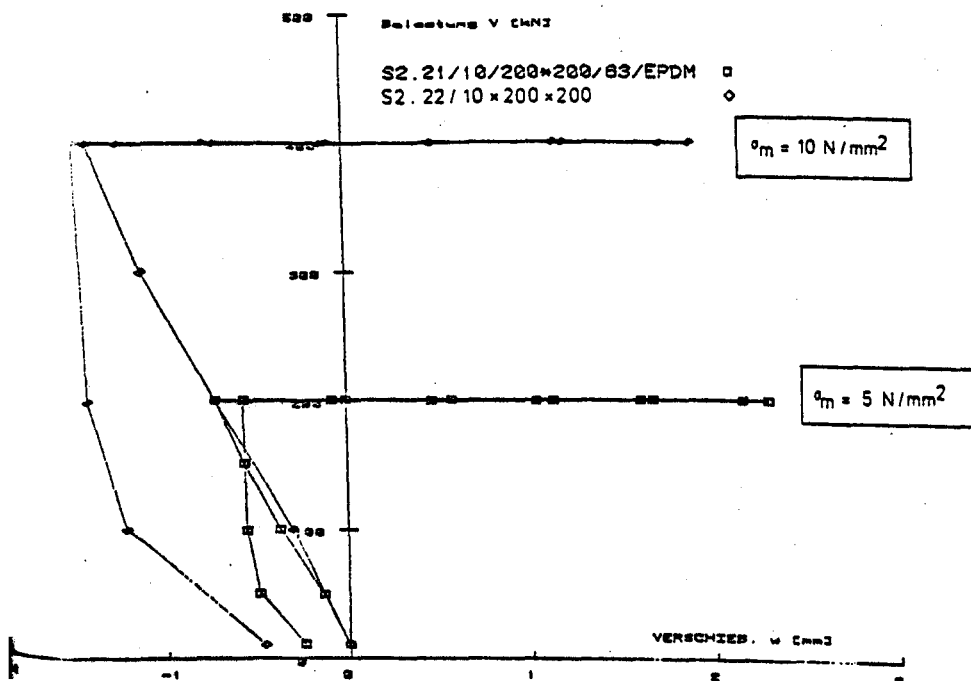


Bild: A 93

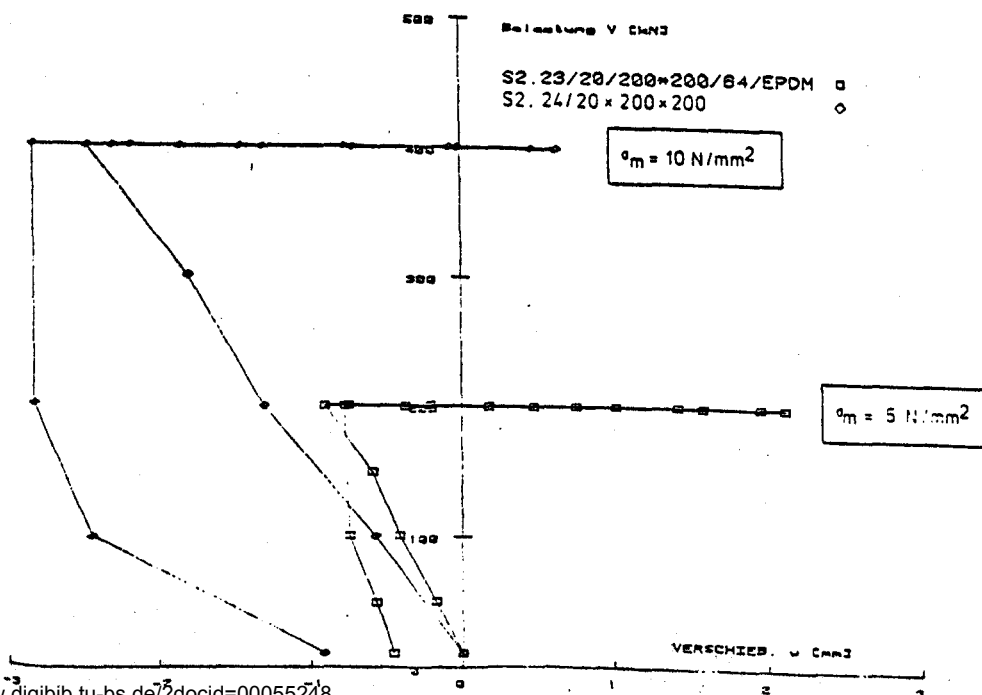


Bild: A 94

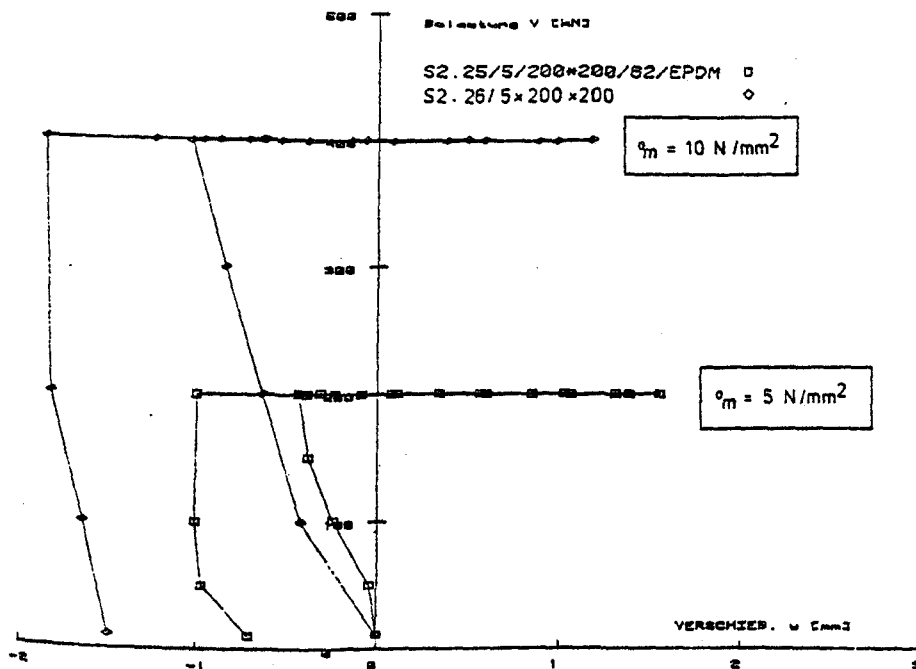


Bild: A 95

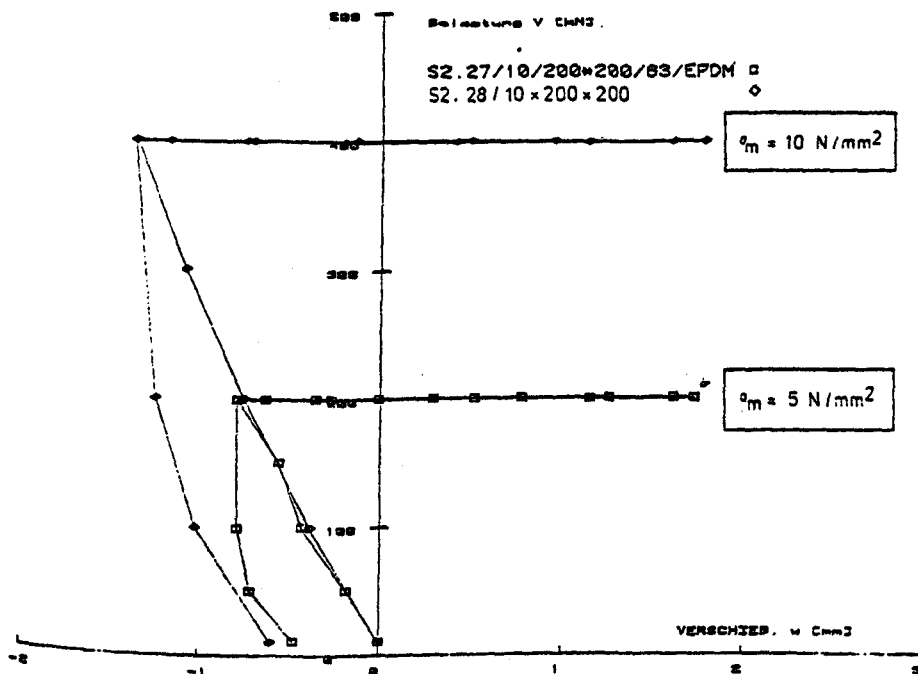


Bild: A 96

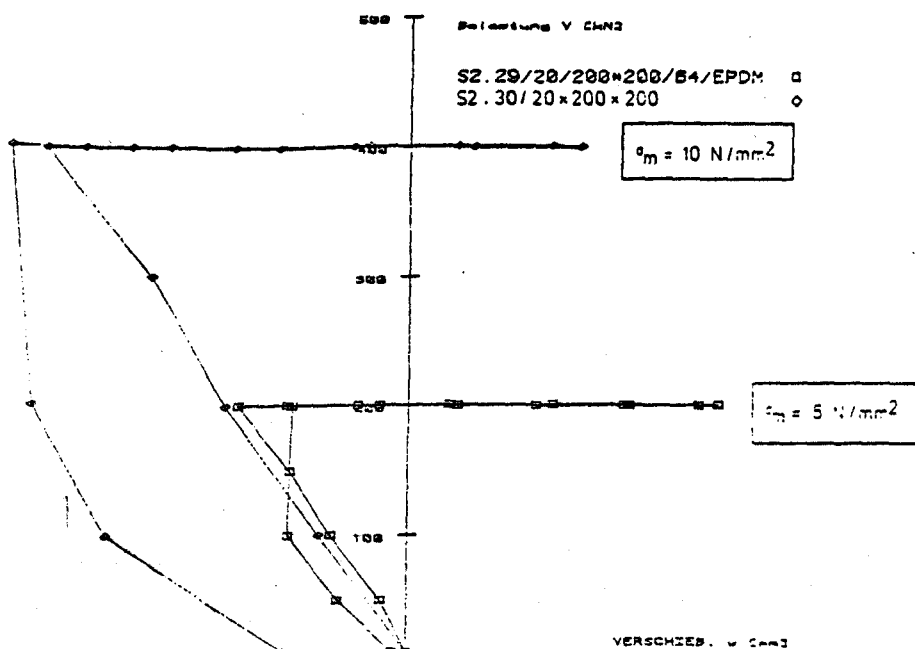


Bild: A 97

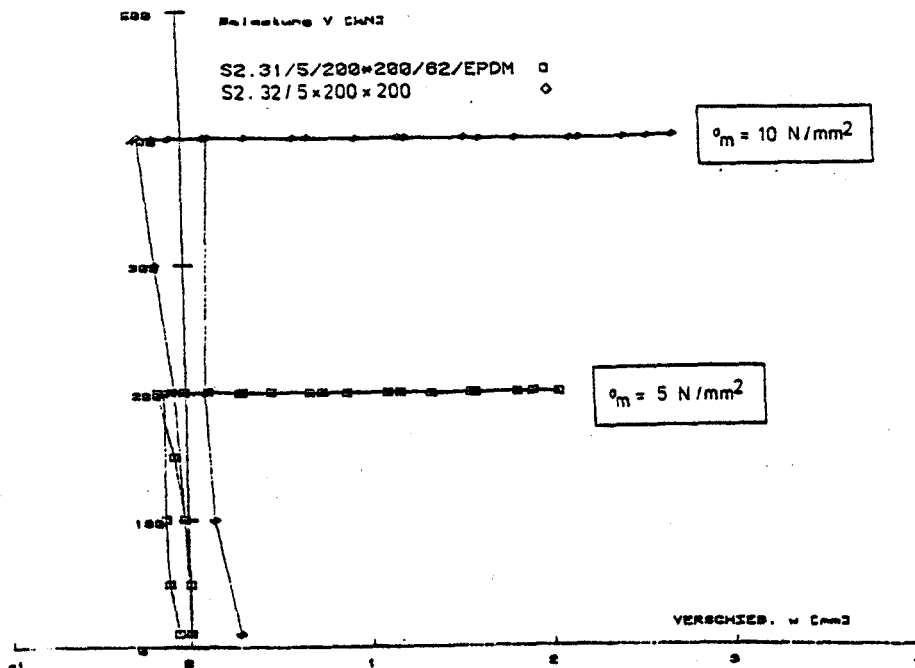


Bild: A 98

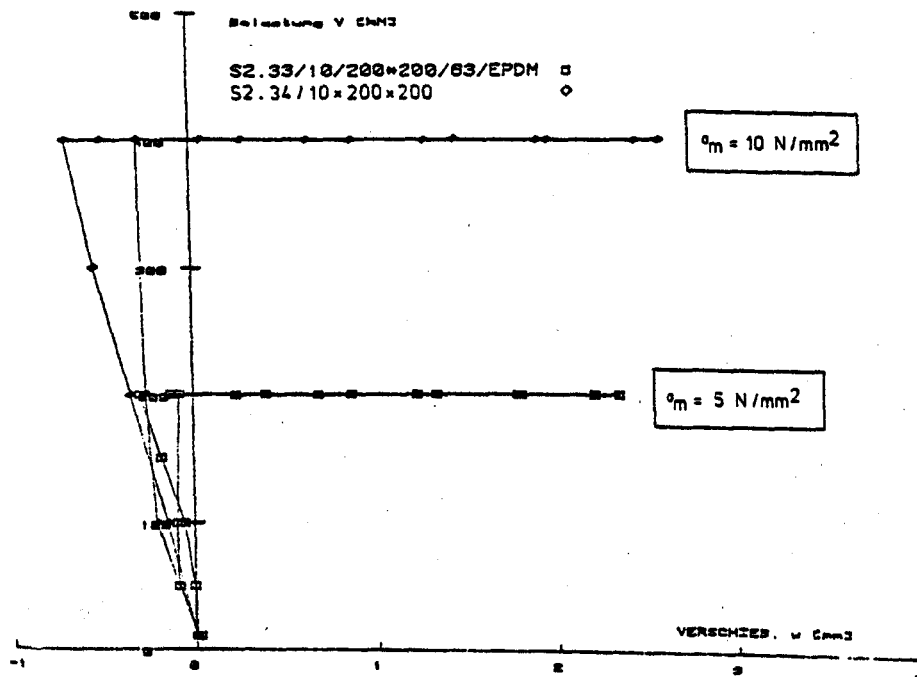


Bild: A 99

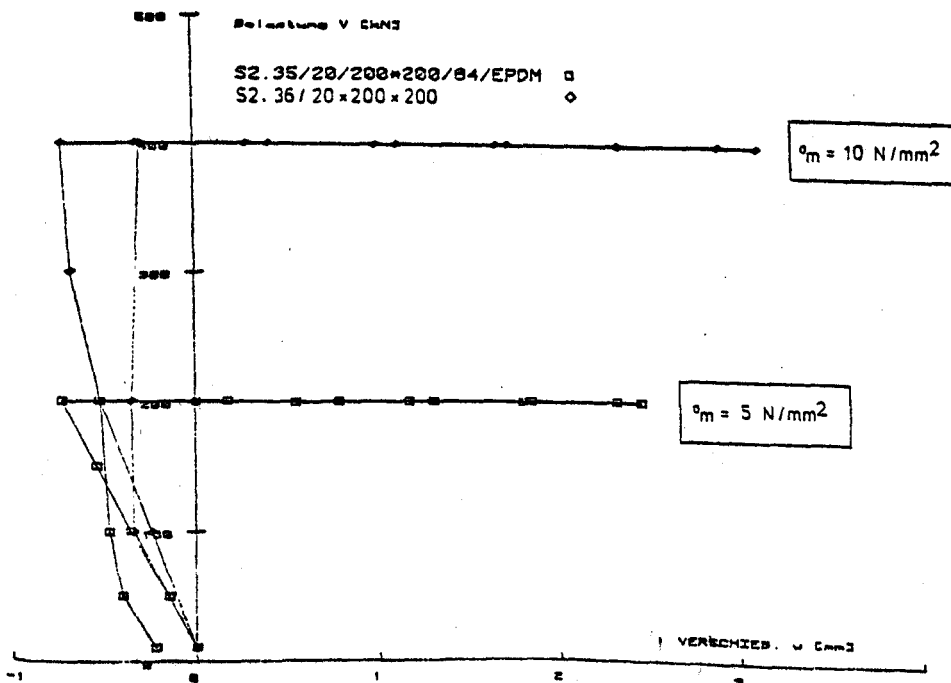


Bild: A 100

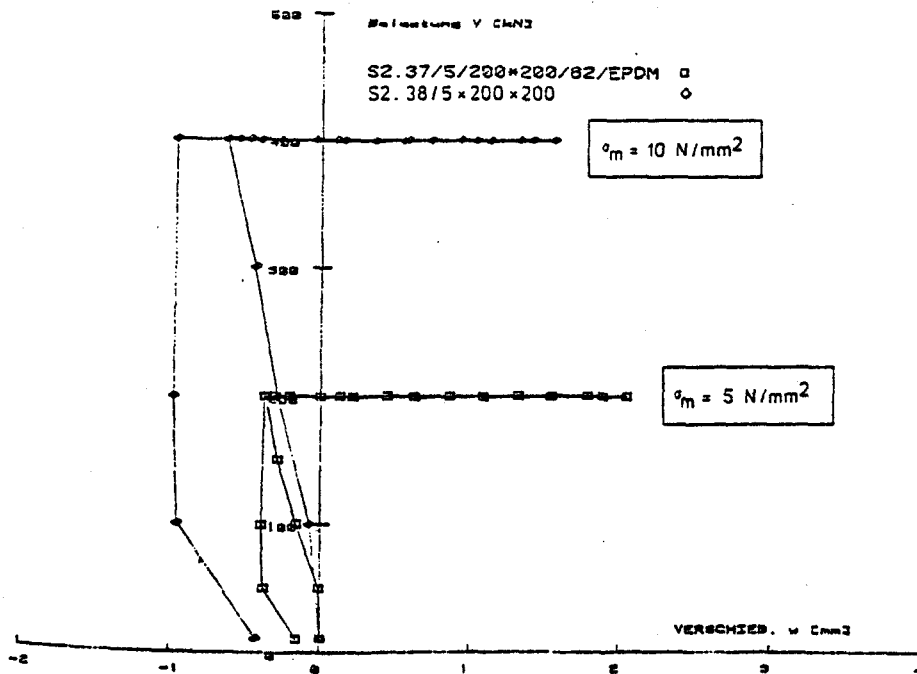


Bild: A 101

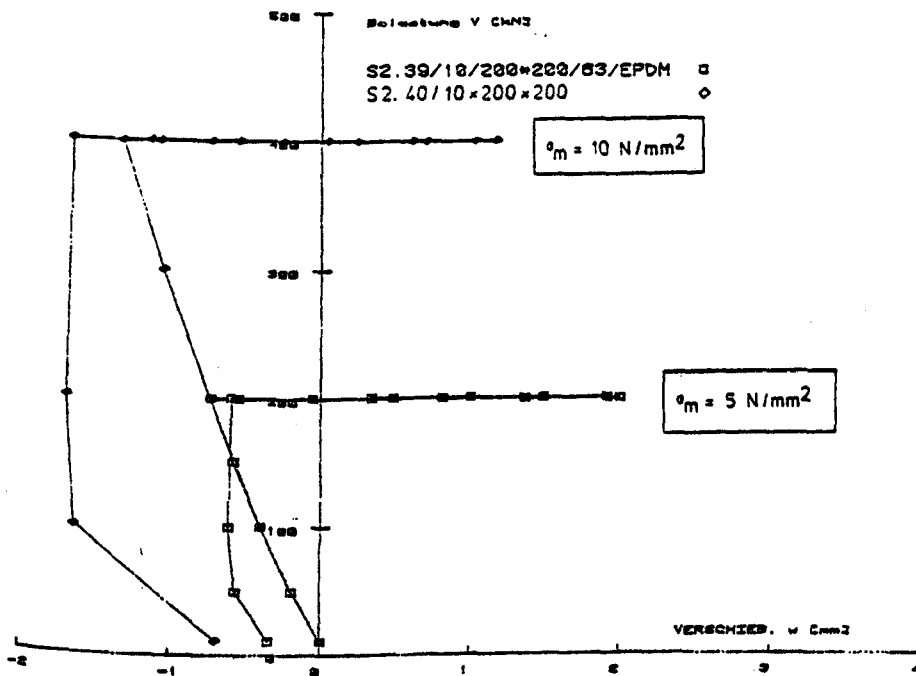


Bild: A 102

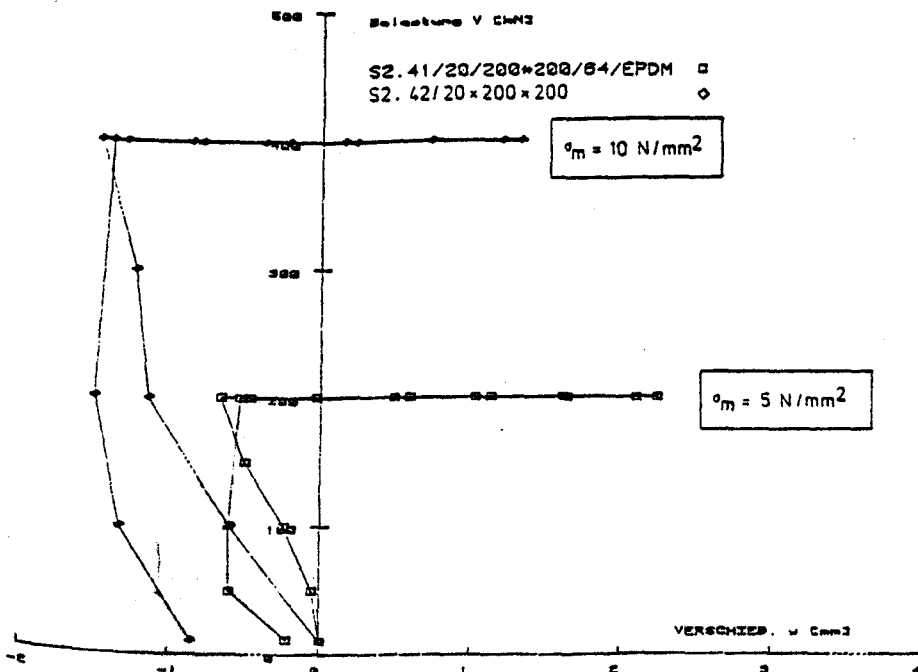


Bild: A 103

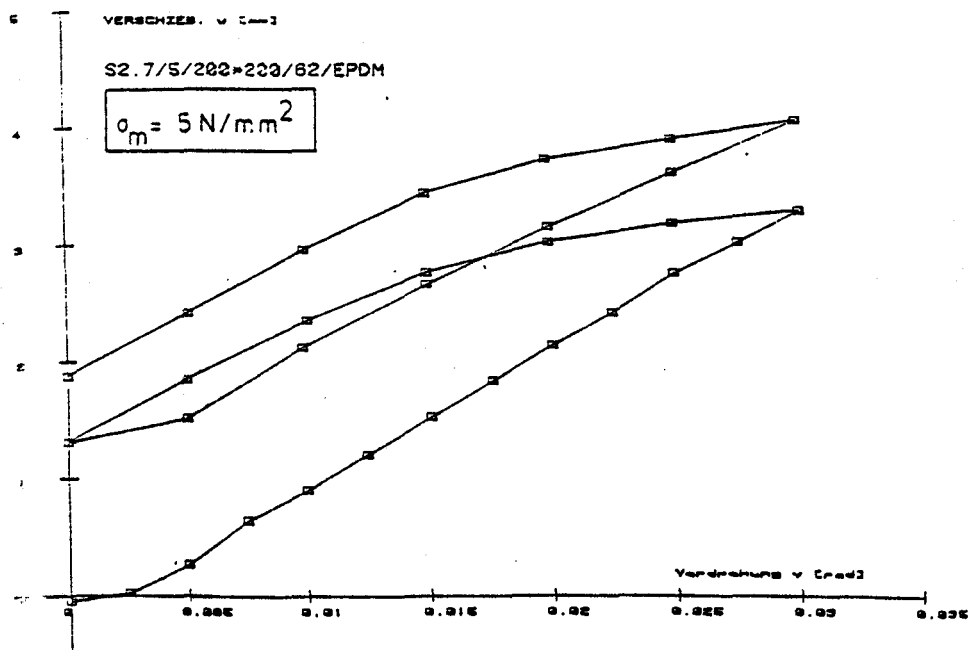


Bild: A 104

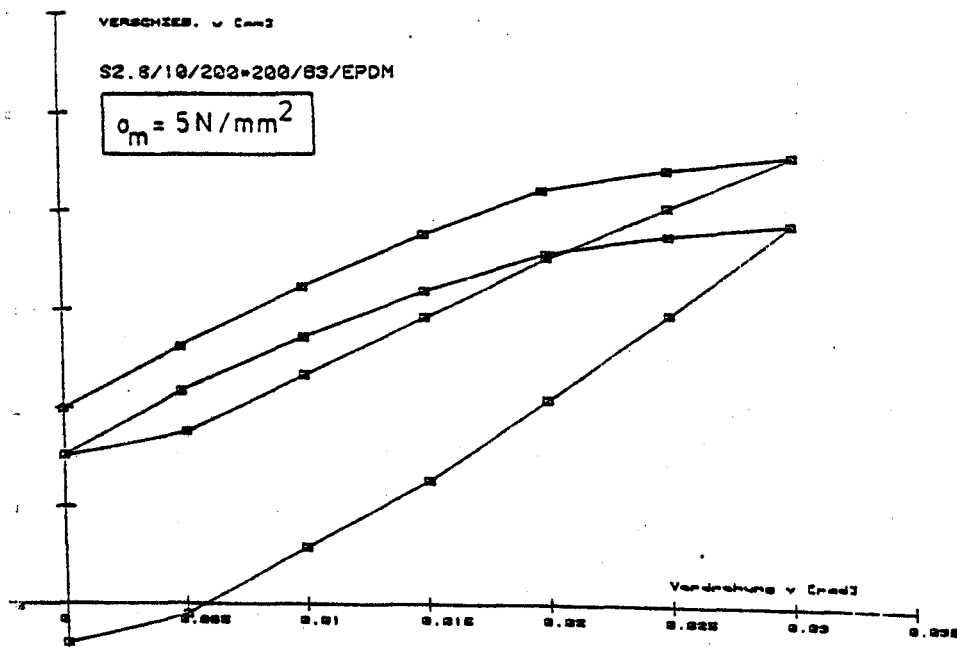


Bild: A 105

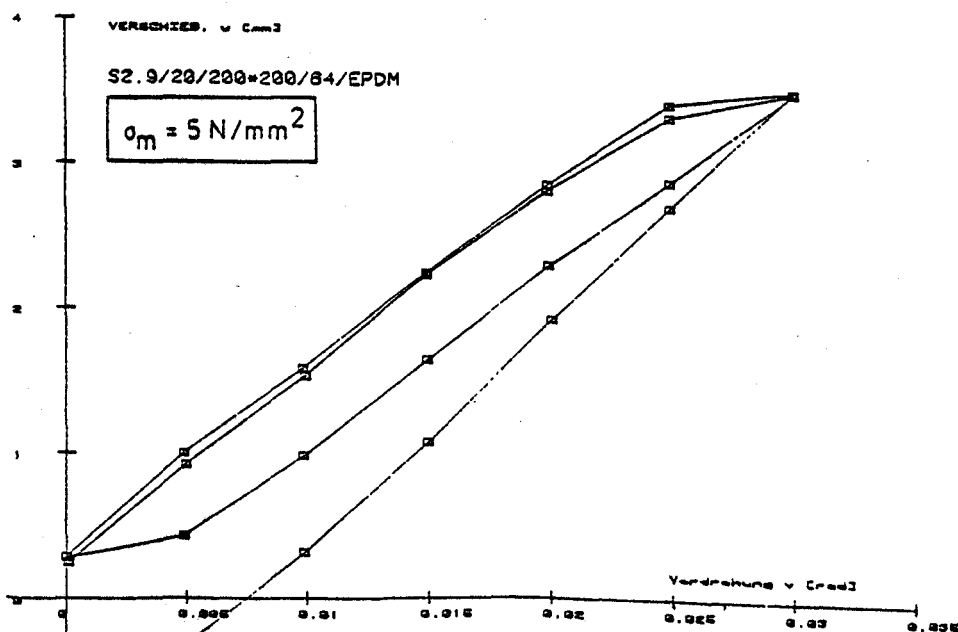


Bild: A 106

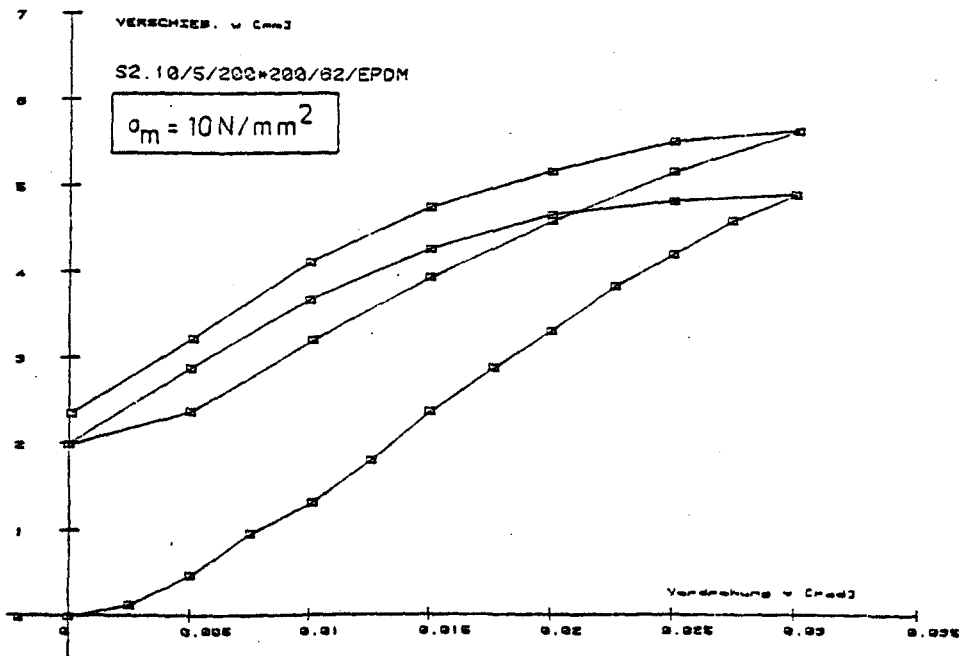


Bild: A 107

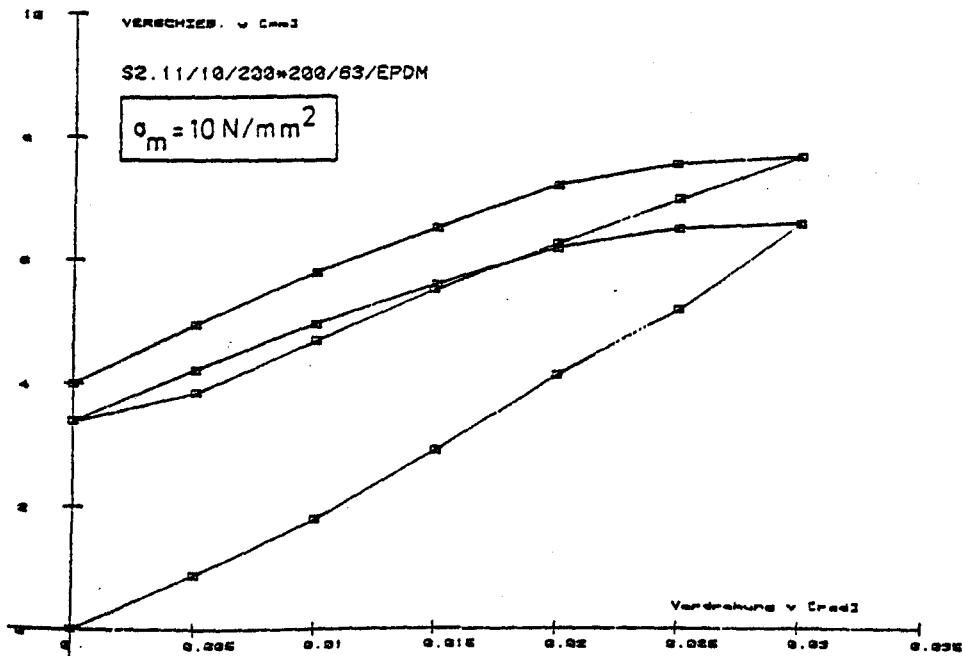


Bild: A 108

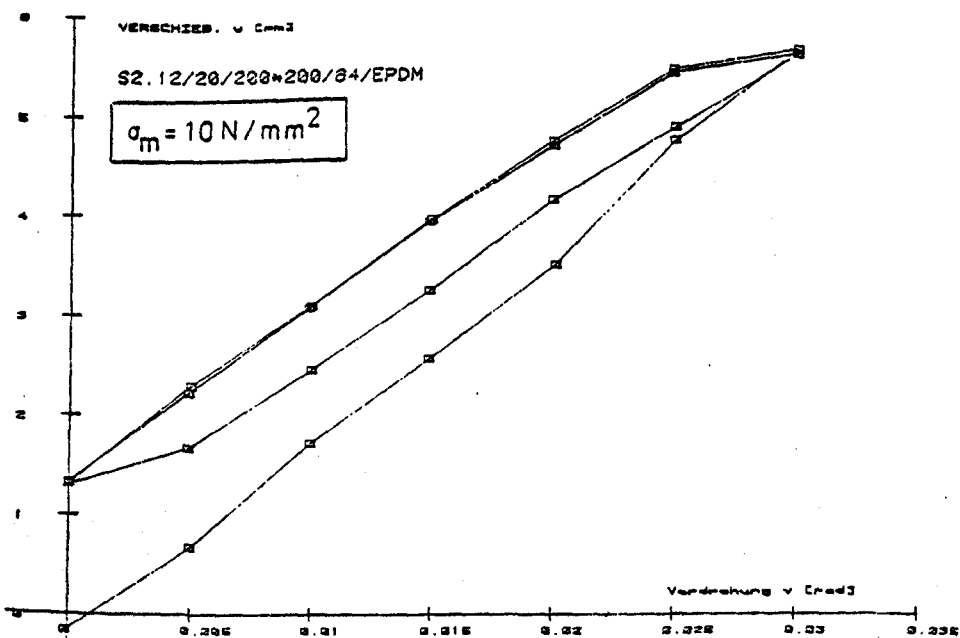


Bild: A 109

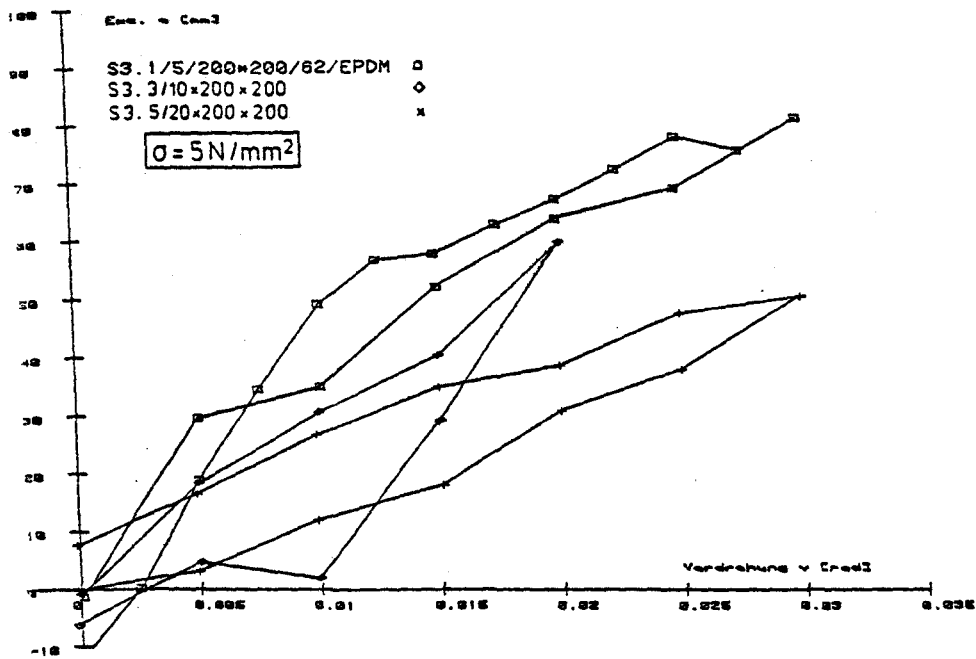


Bild: A 110

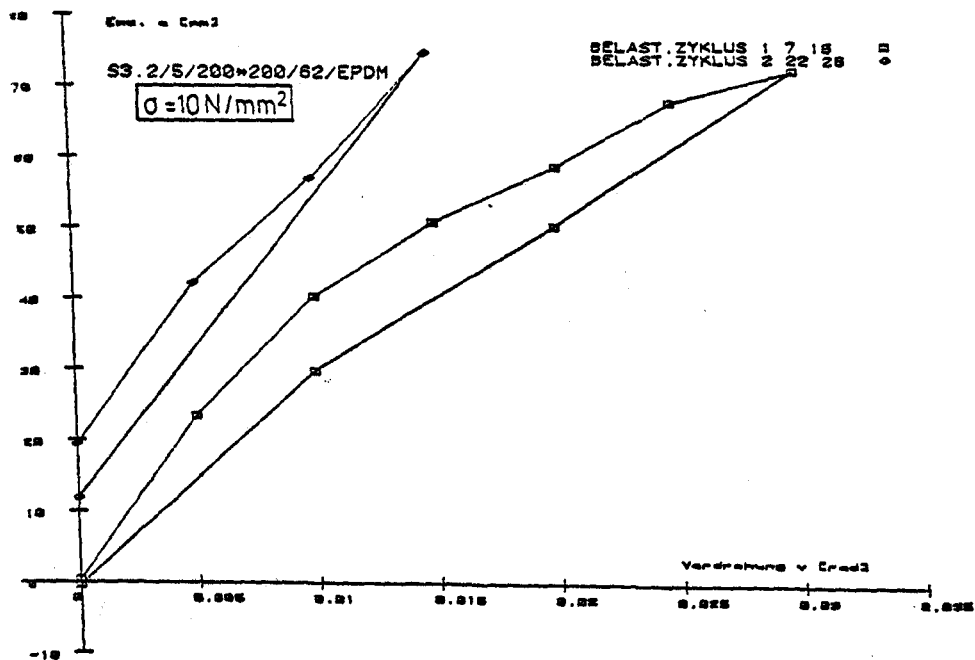


Bild: A 111

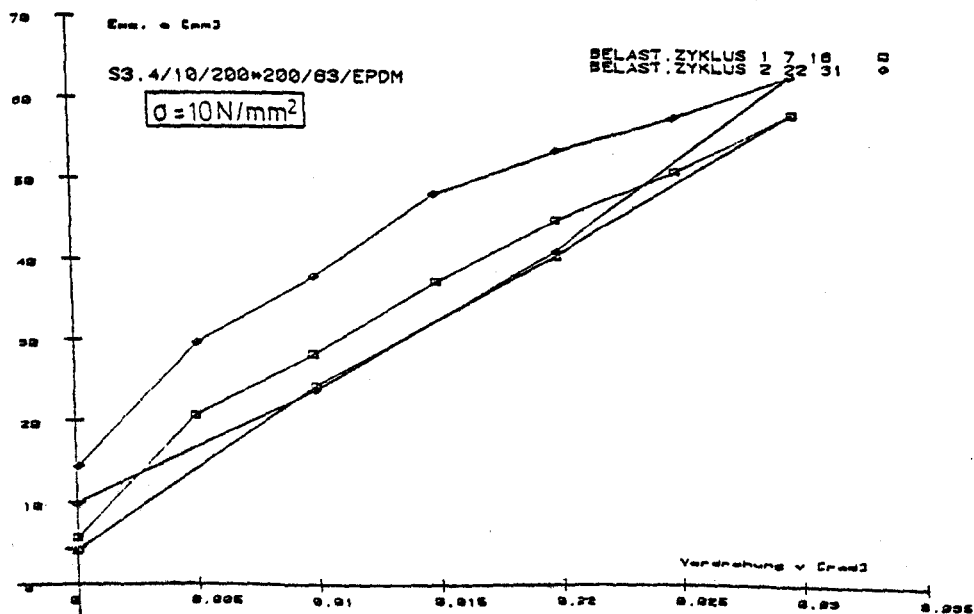


Bild: A 112

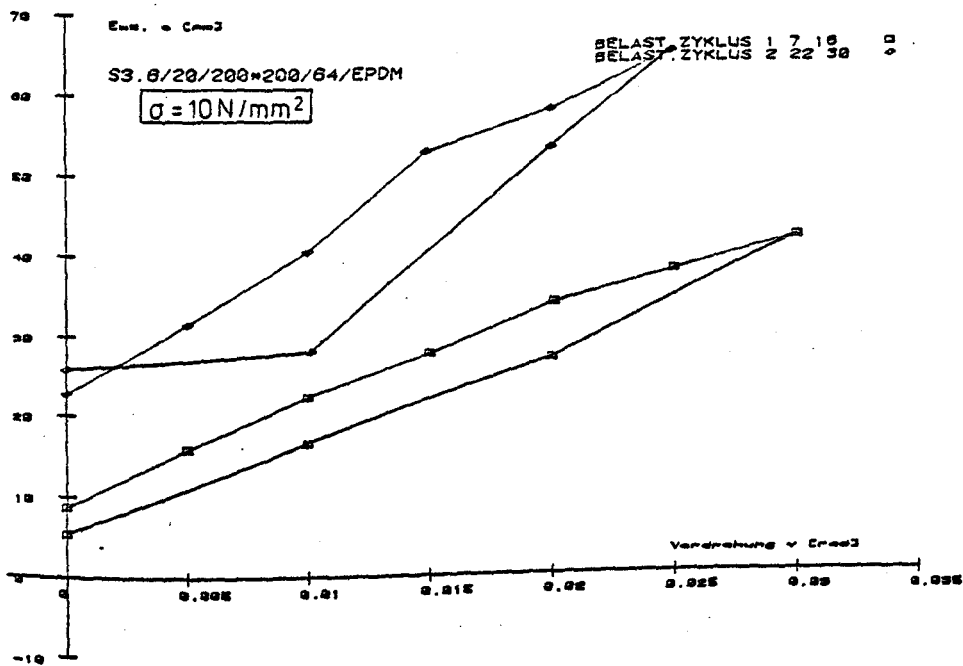


Bild: A 113

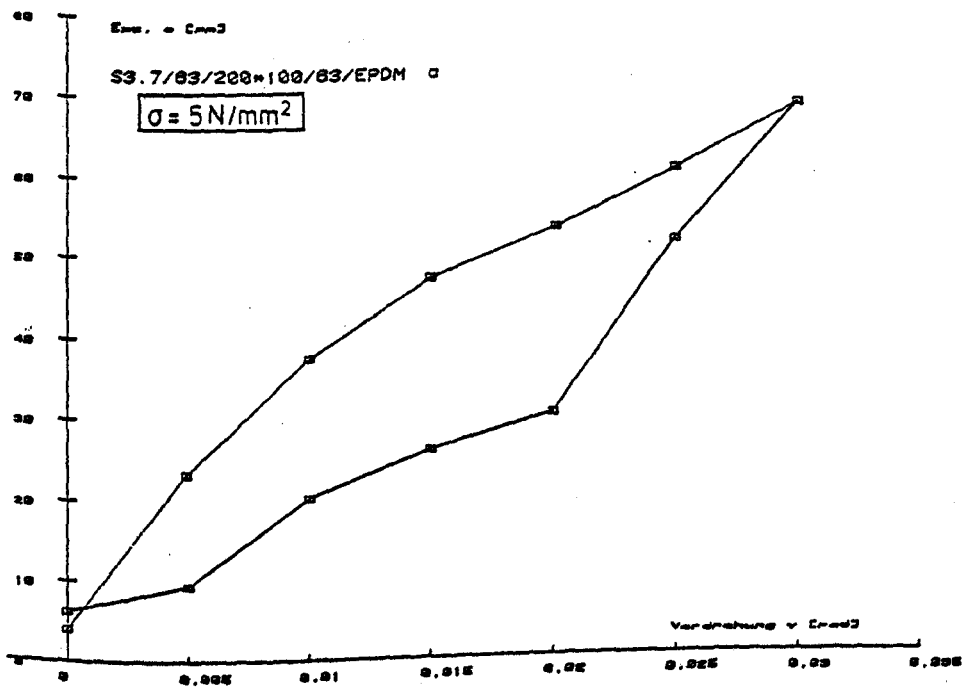


Bild: A 114

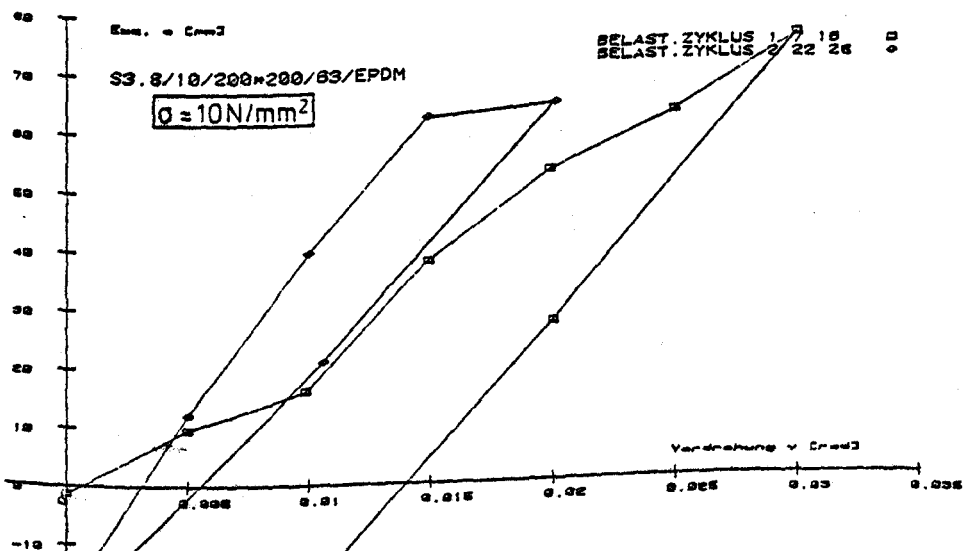


Bild: A 115

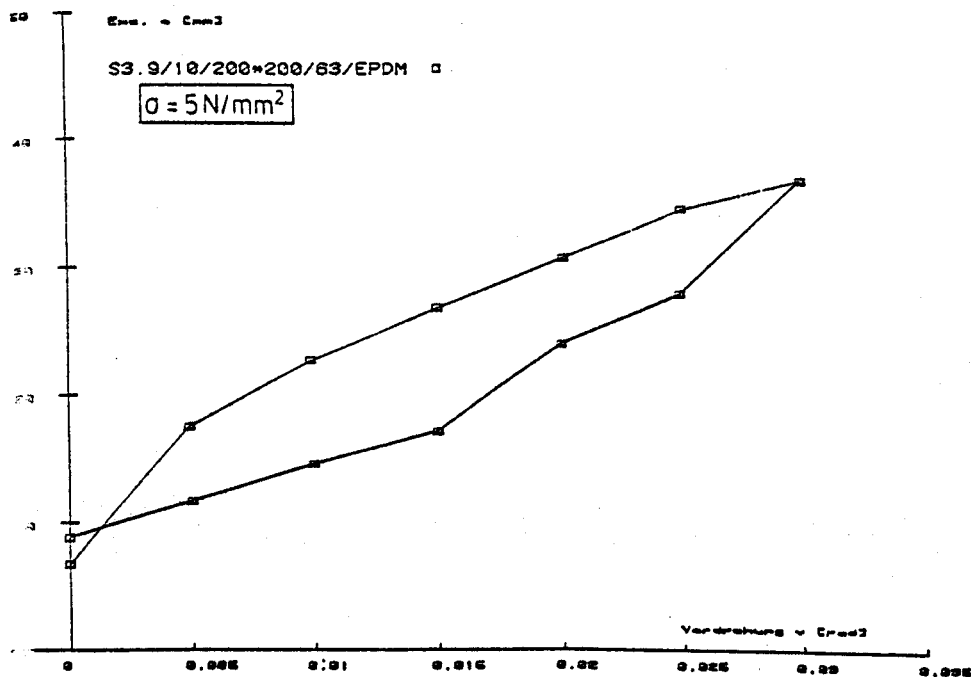


Bild: A 116

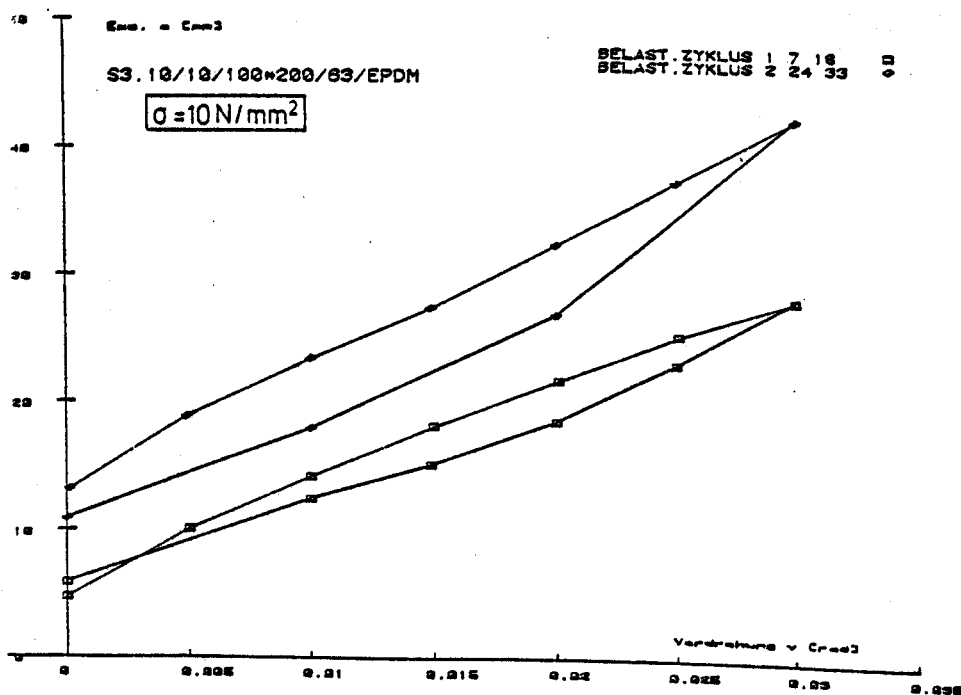


Bild: A 117

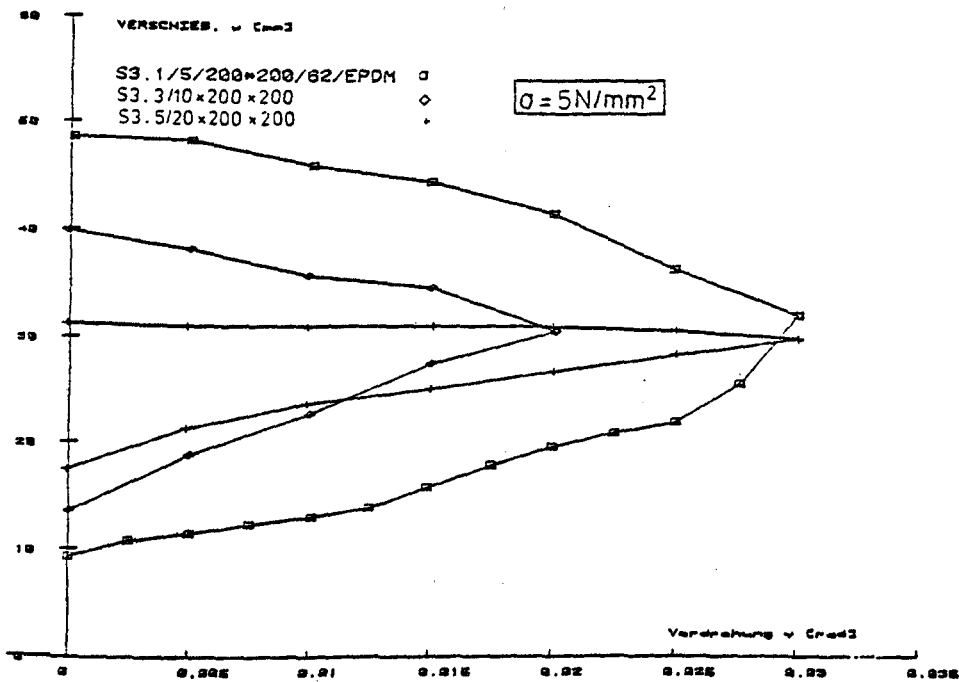


Bild: A 118

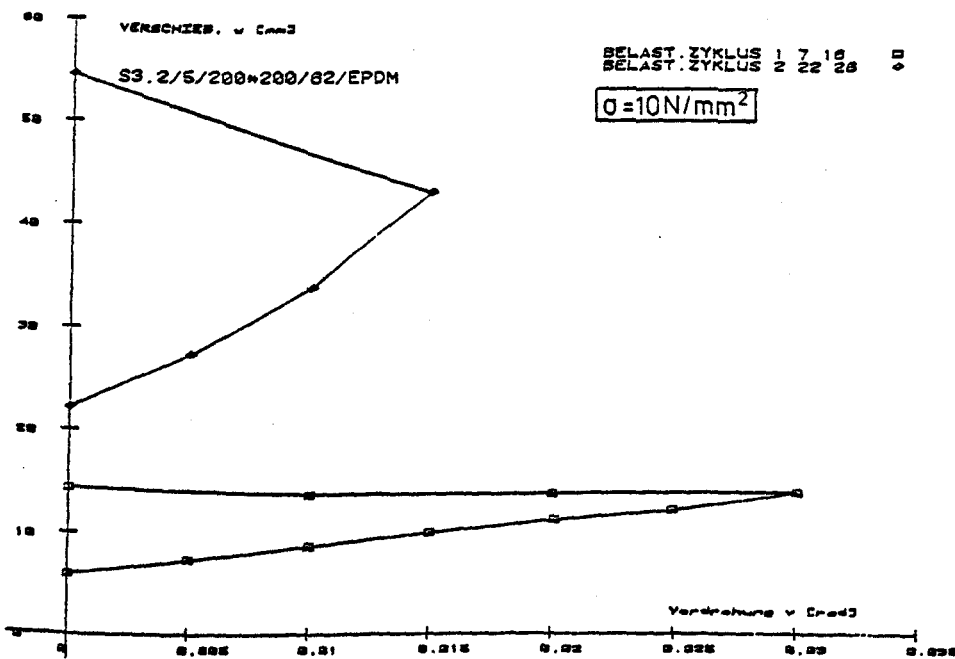


Bild: A 119

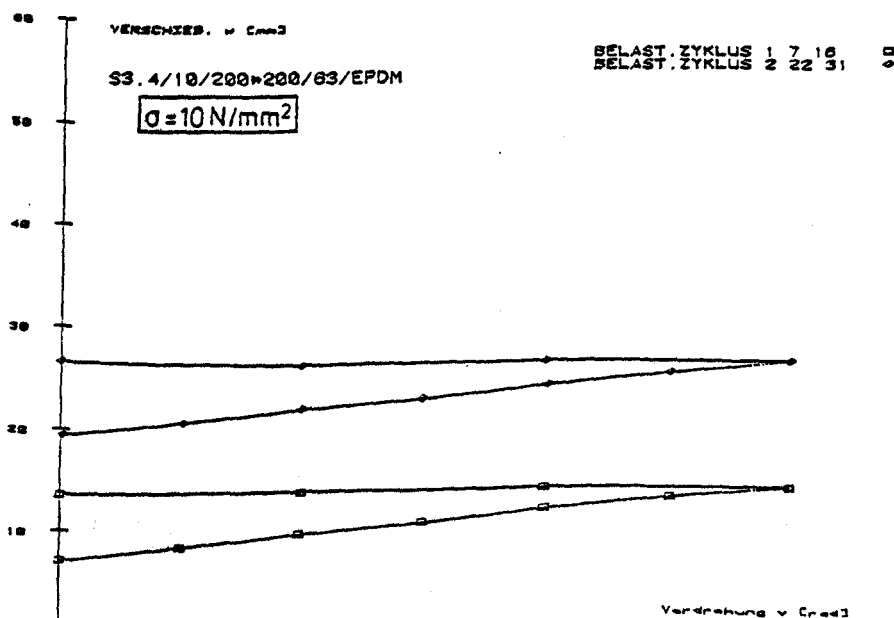


Bild: A 120

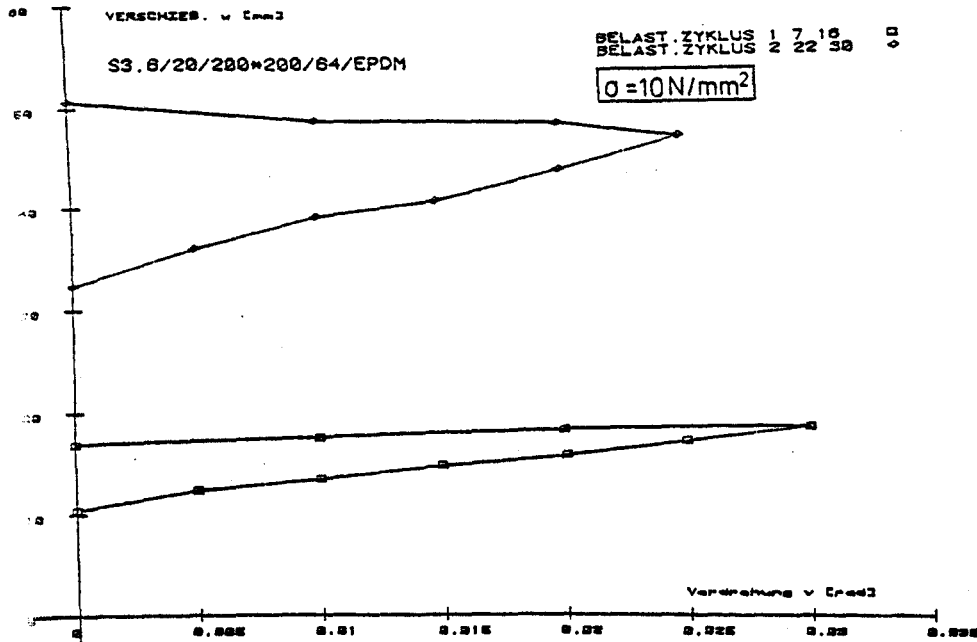


Bild: A 121

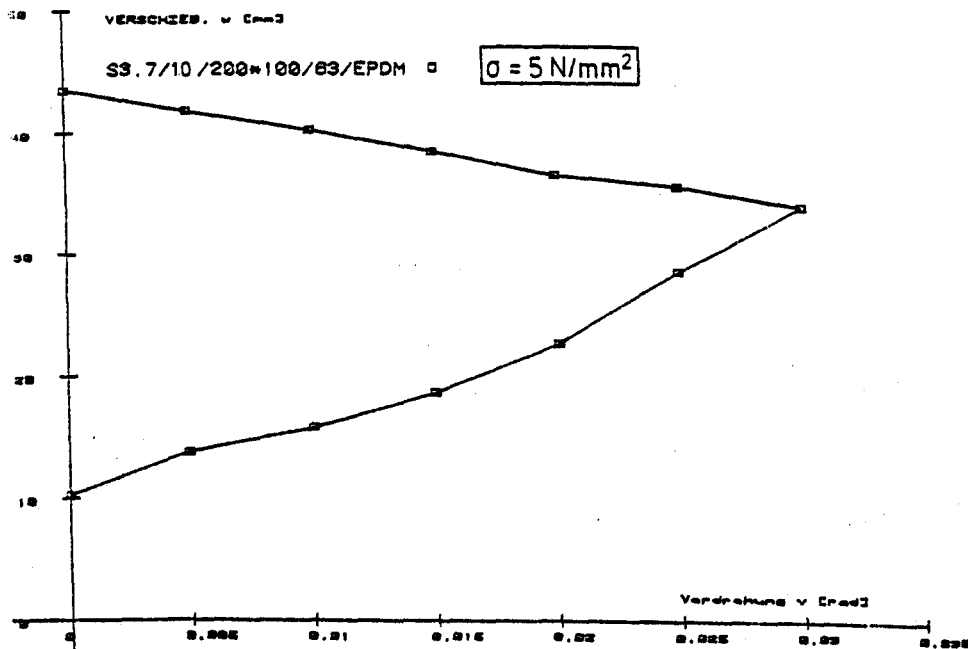


Bild: A 122

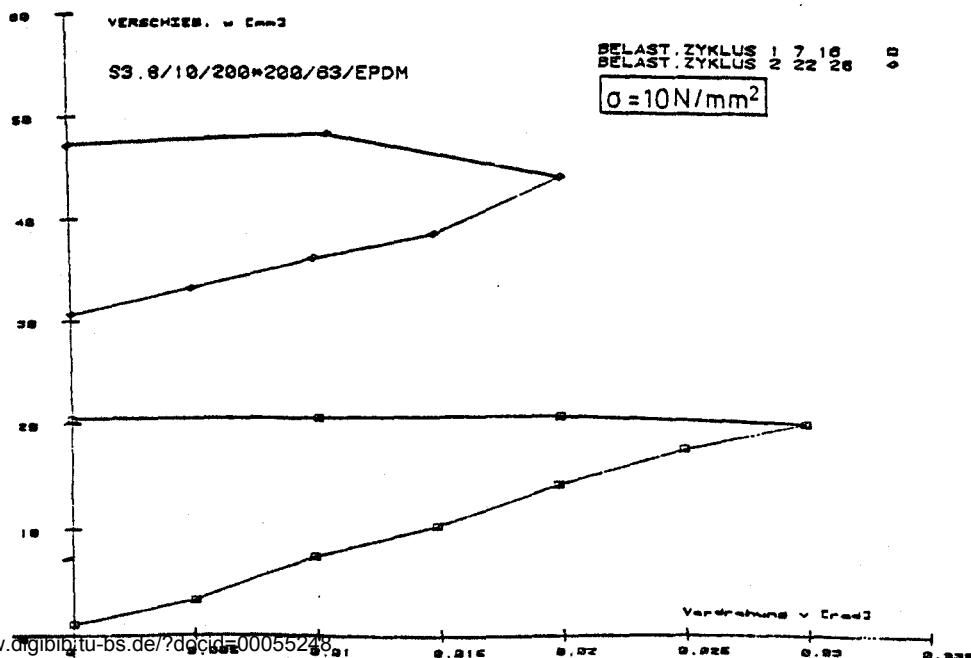


Bild: A 123

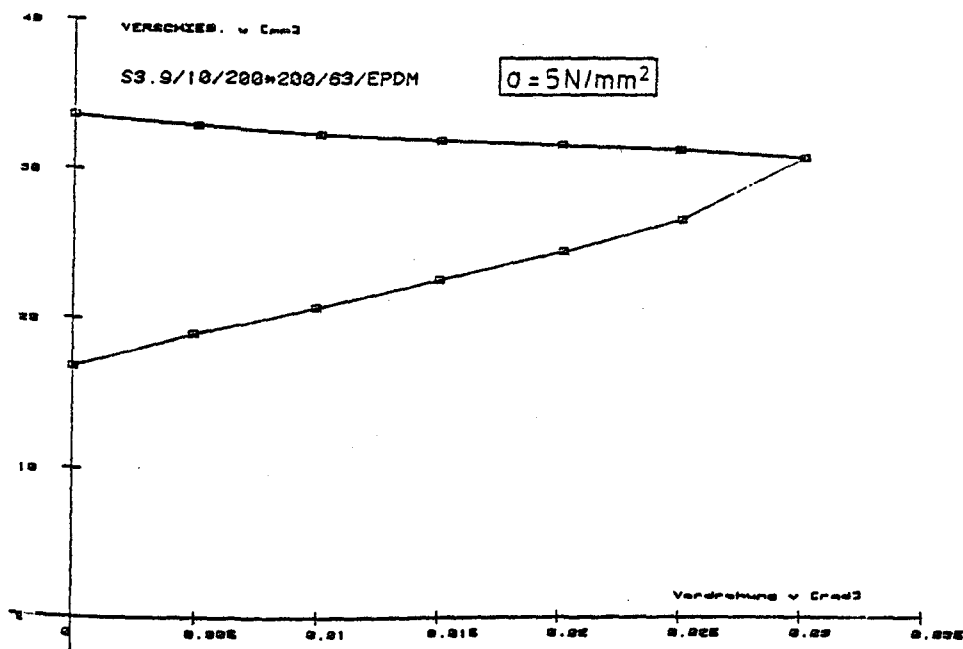


Bild: A 124

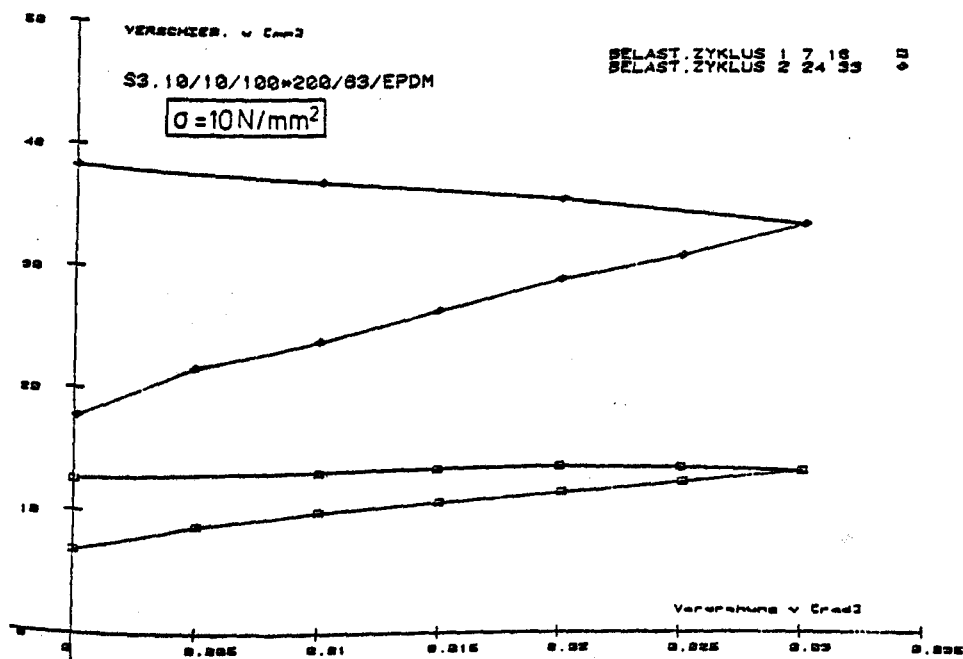


Bild: A 125

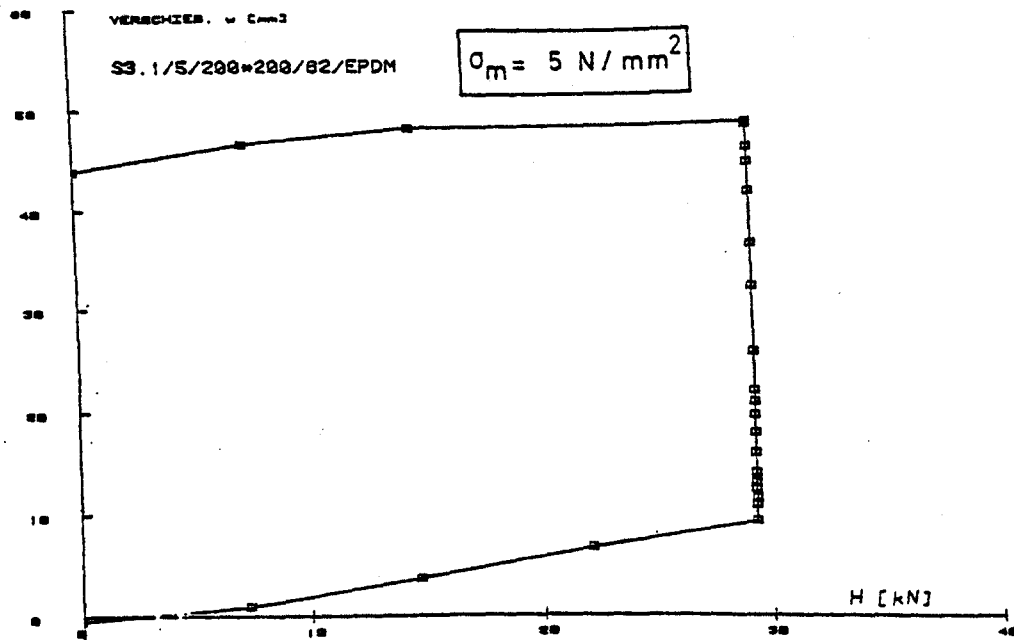


Bild: A 125

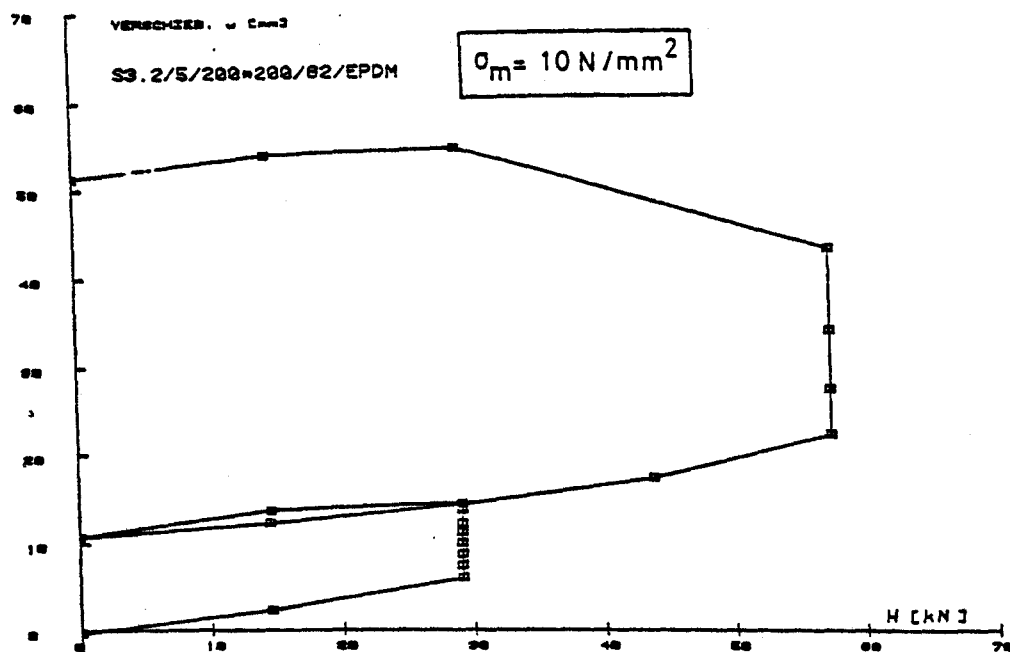


Bild: A 126

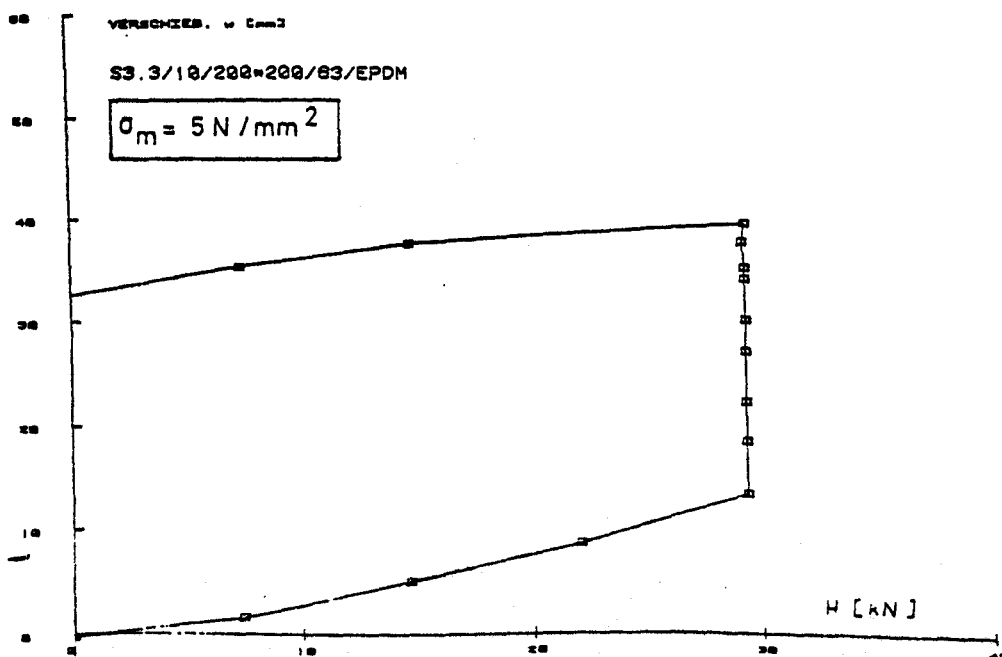


Bild: A 127

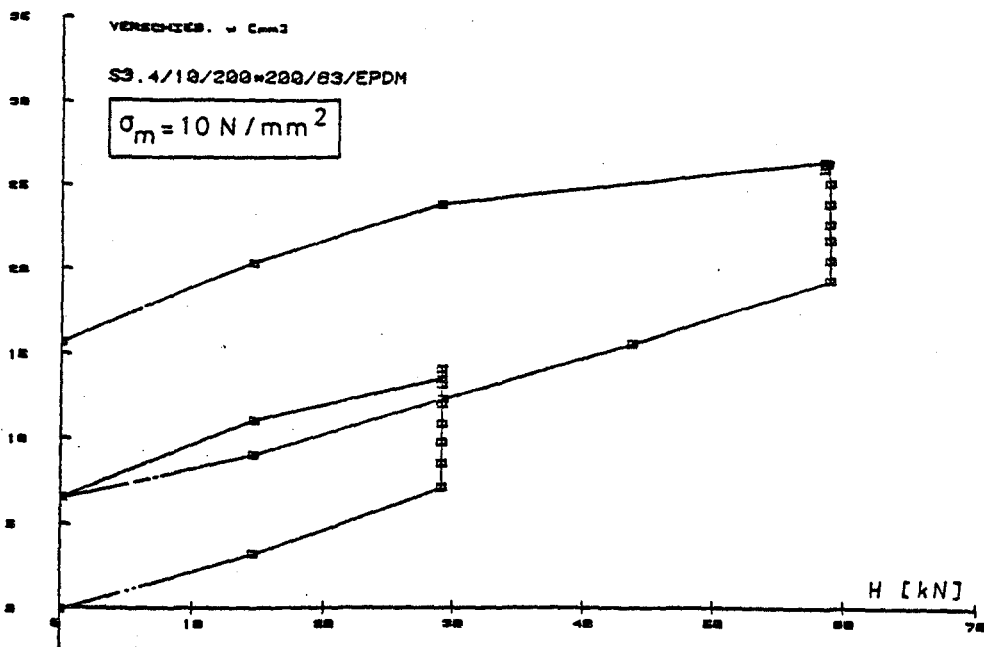


Bild: A 12:

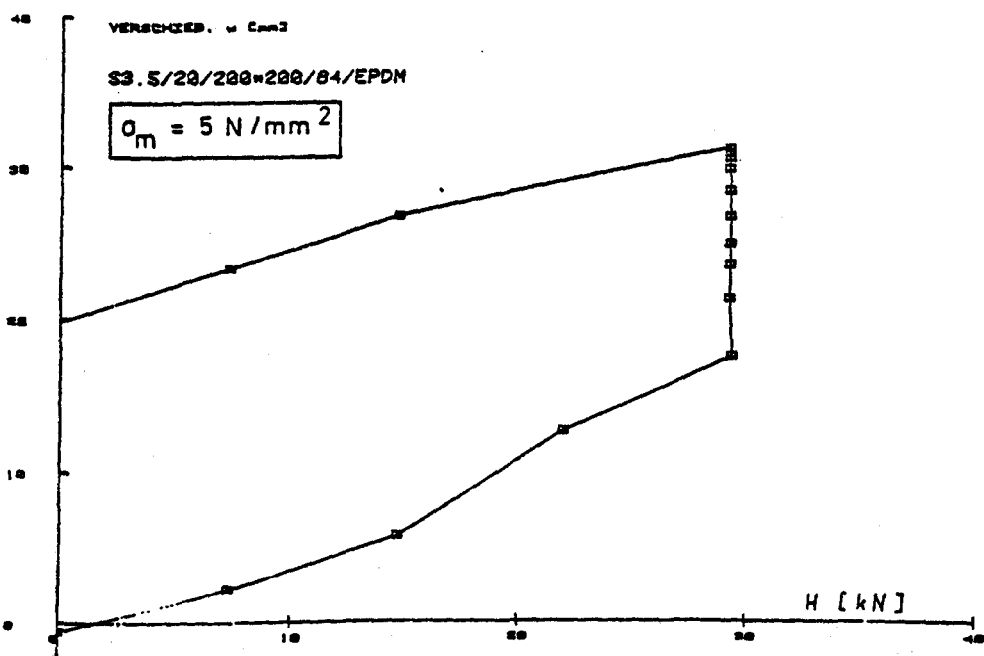


Bild: A 12:

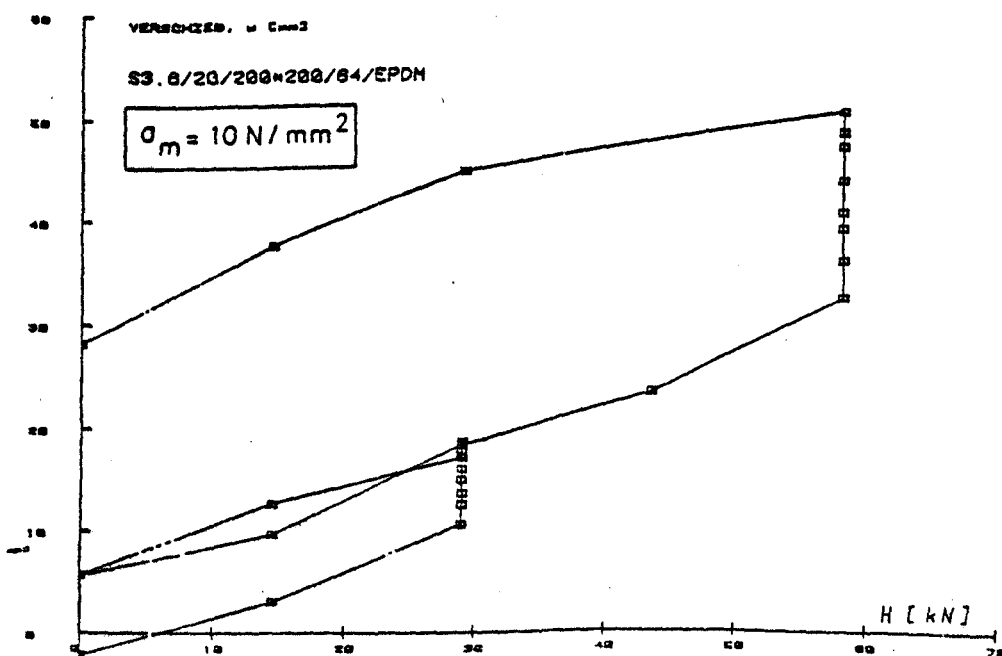


Bild: A 13:

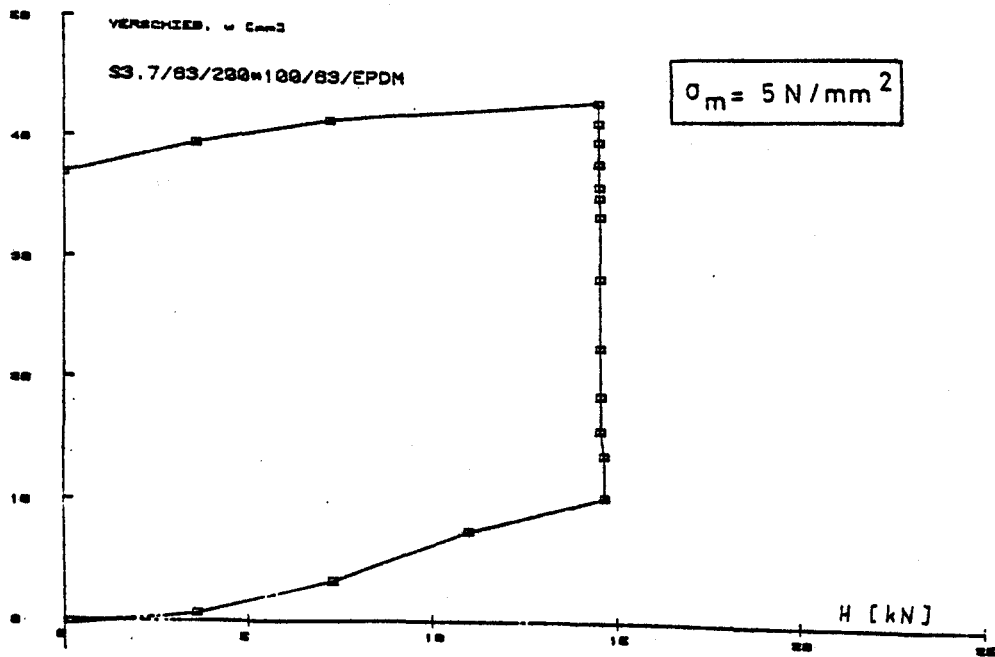


Bild: A 131

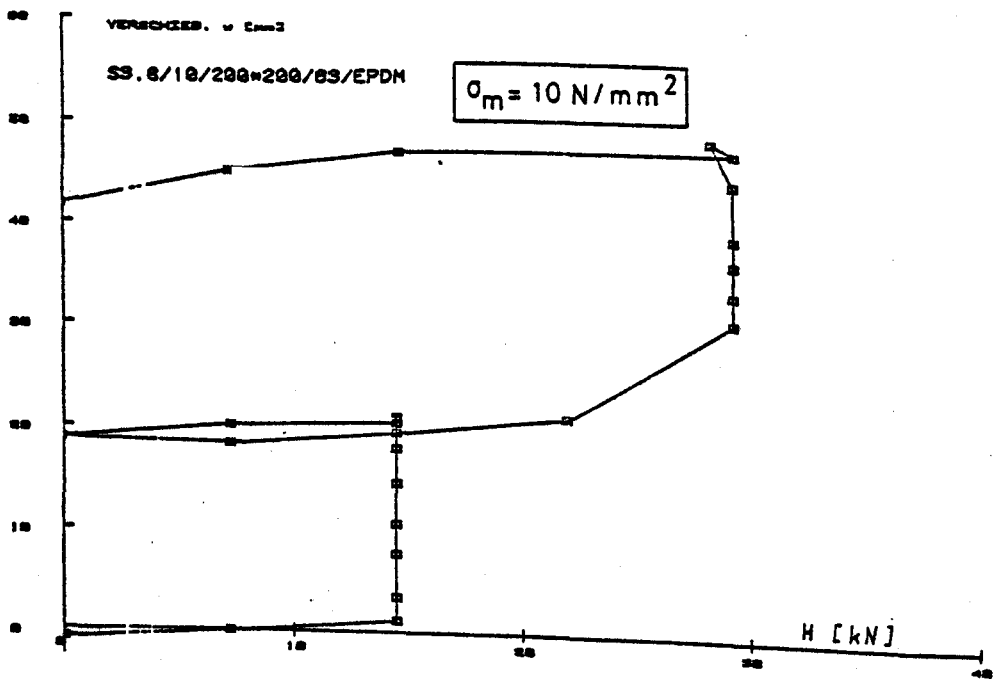


Bild: A 132

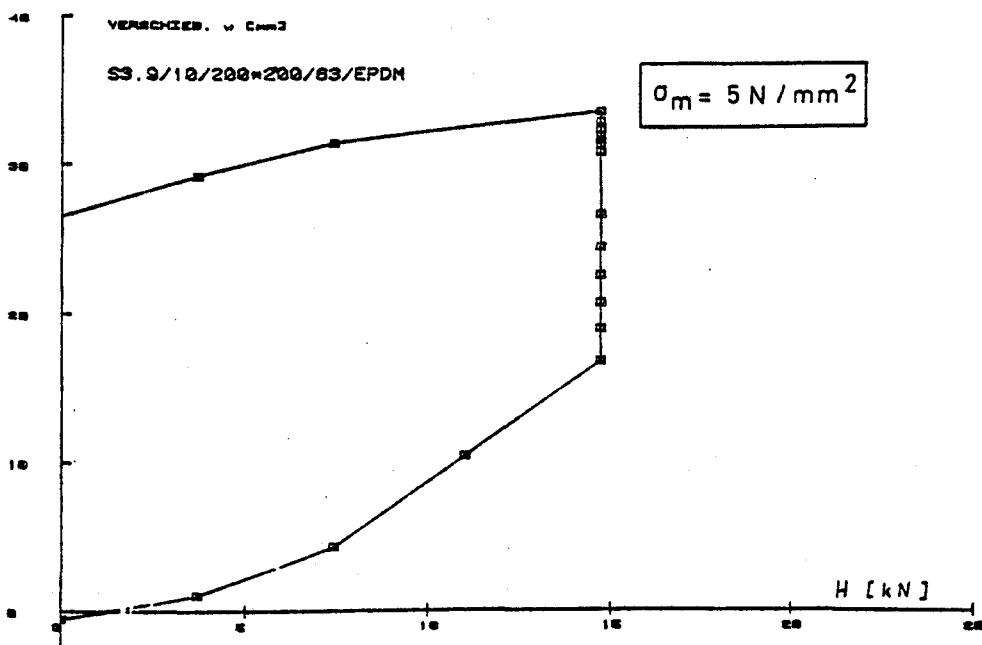


Bild: A 133

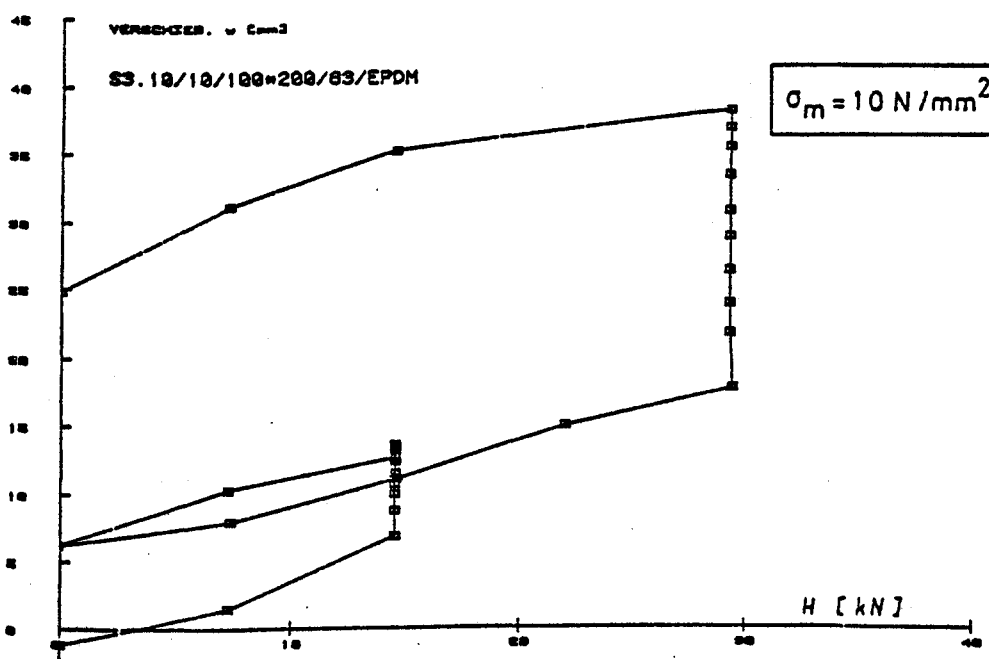
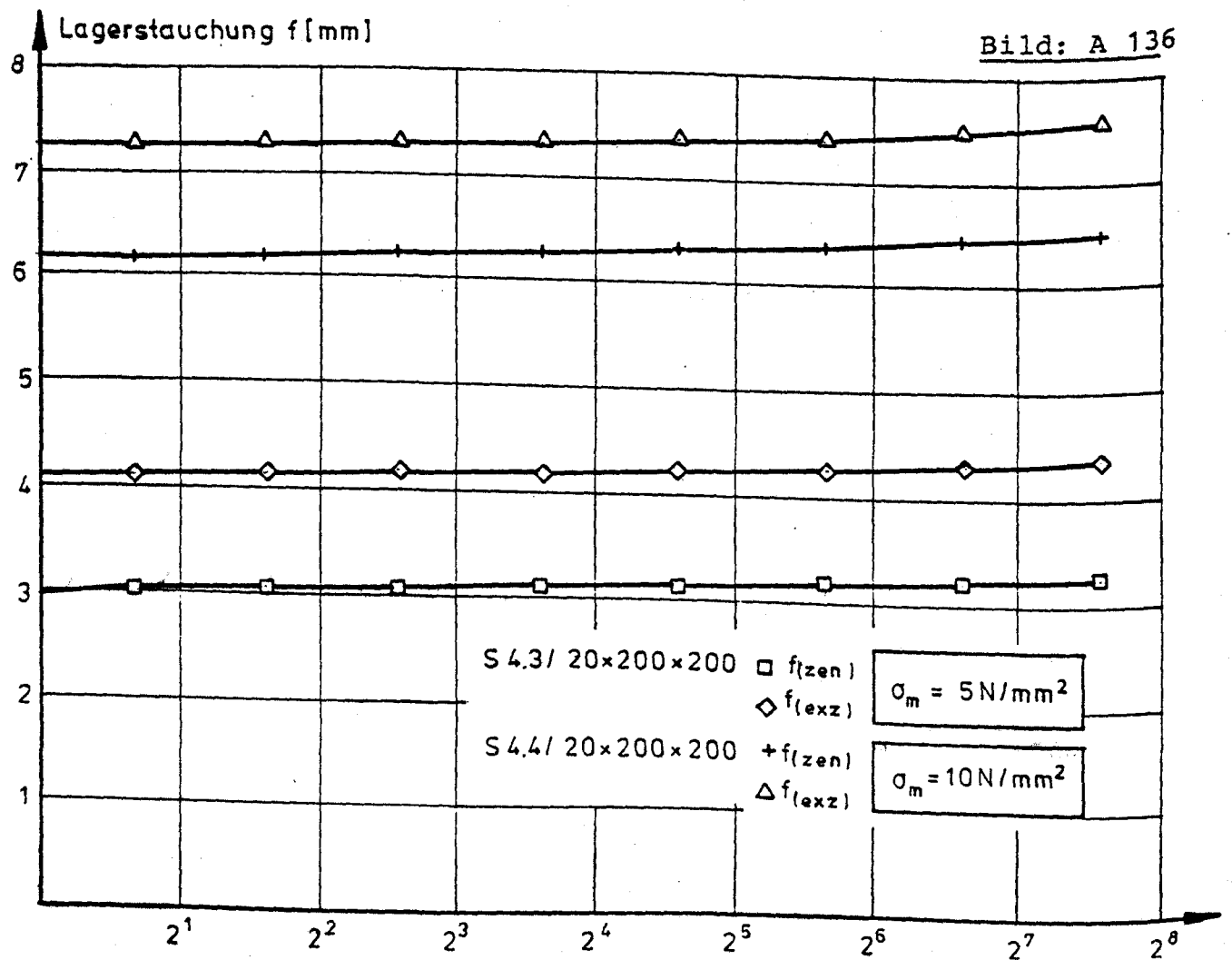
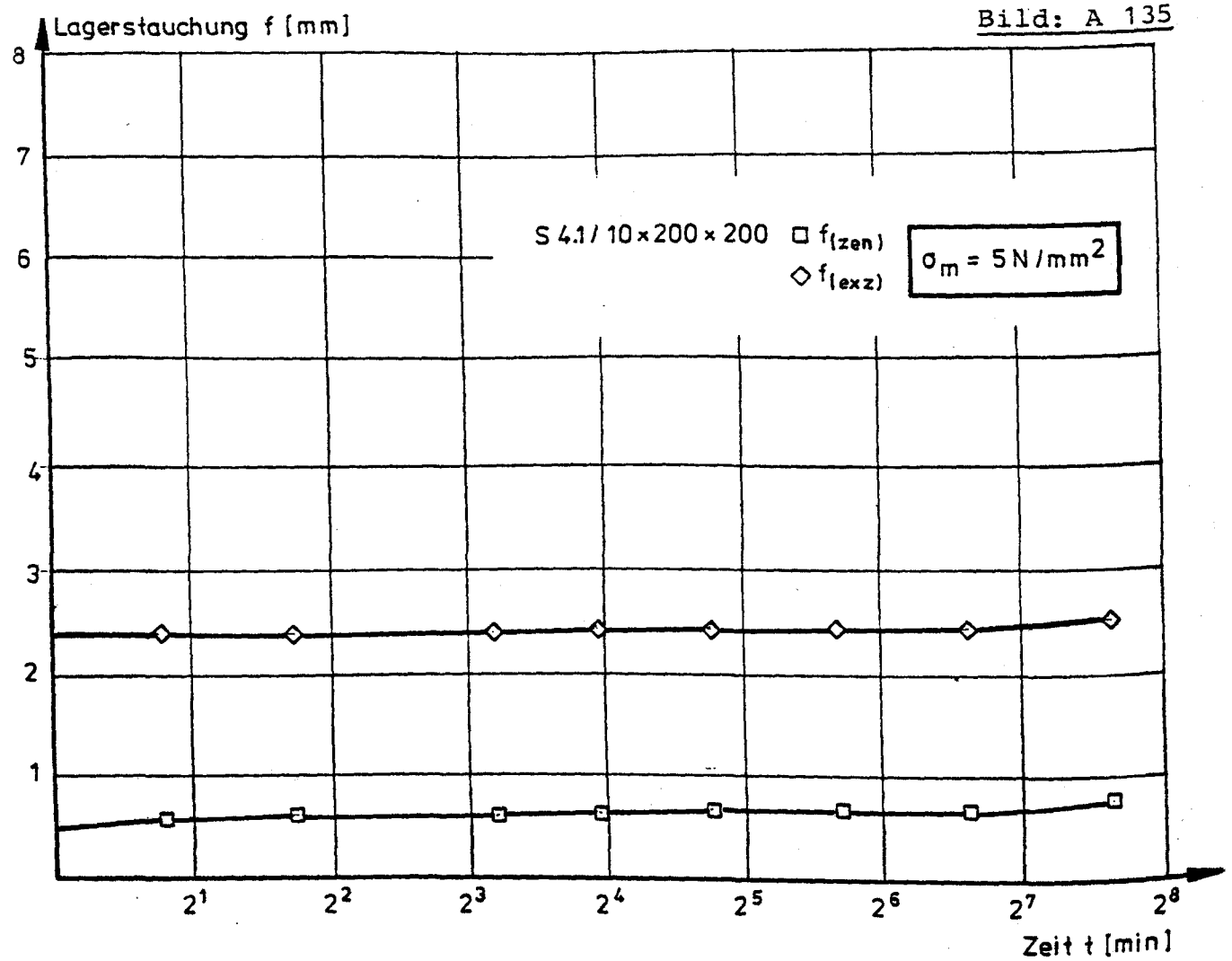
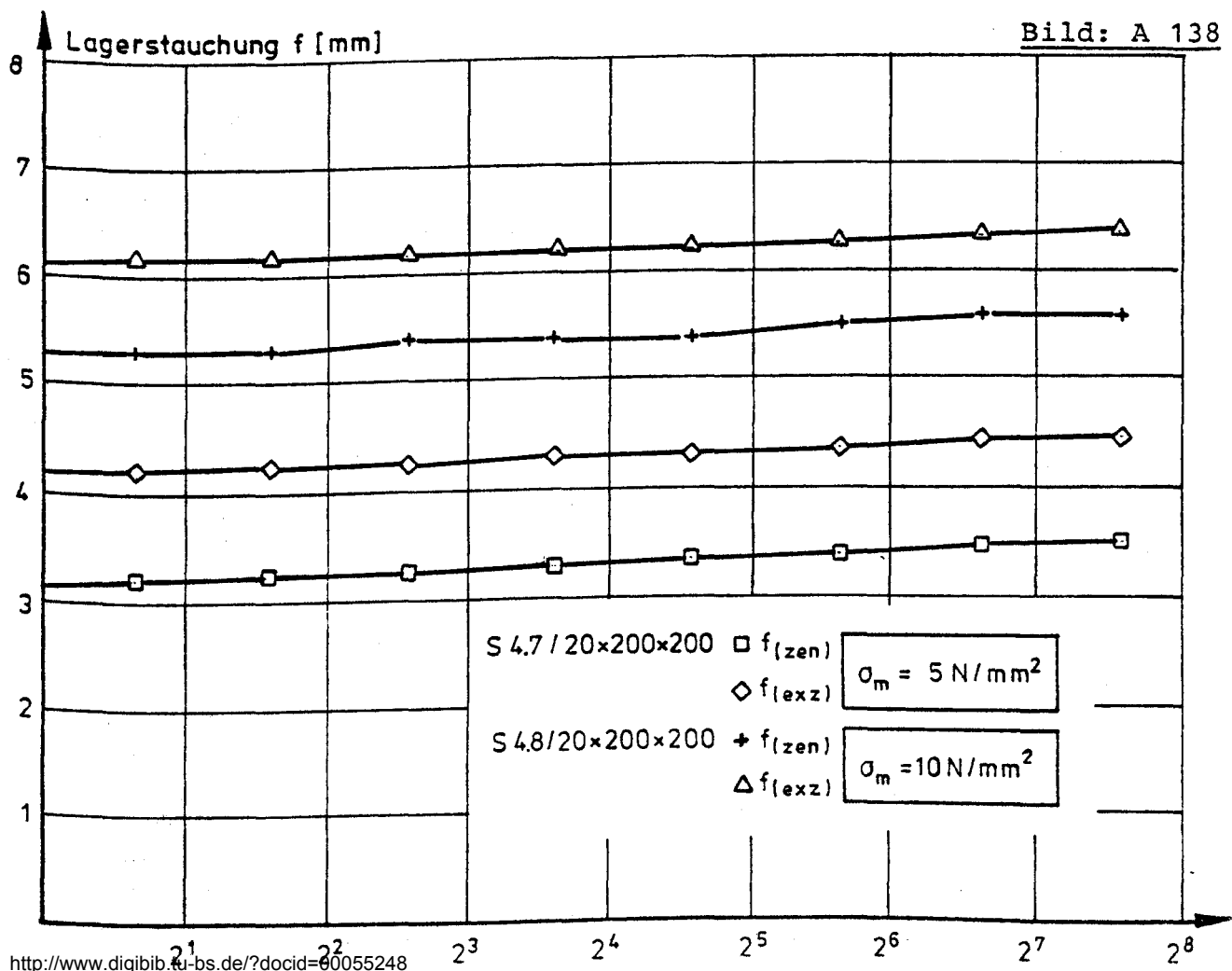
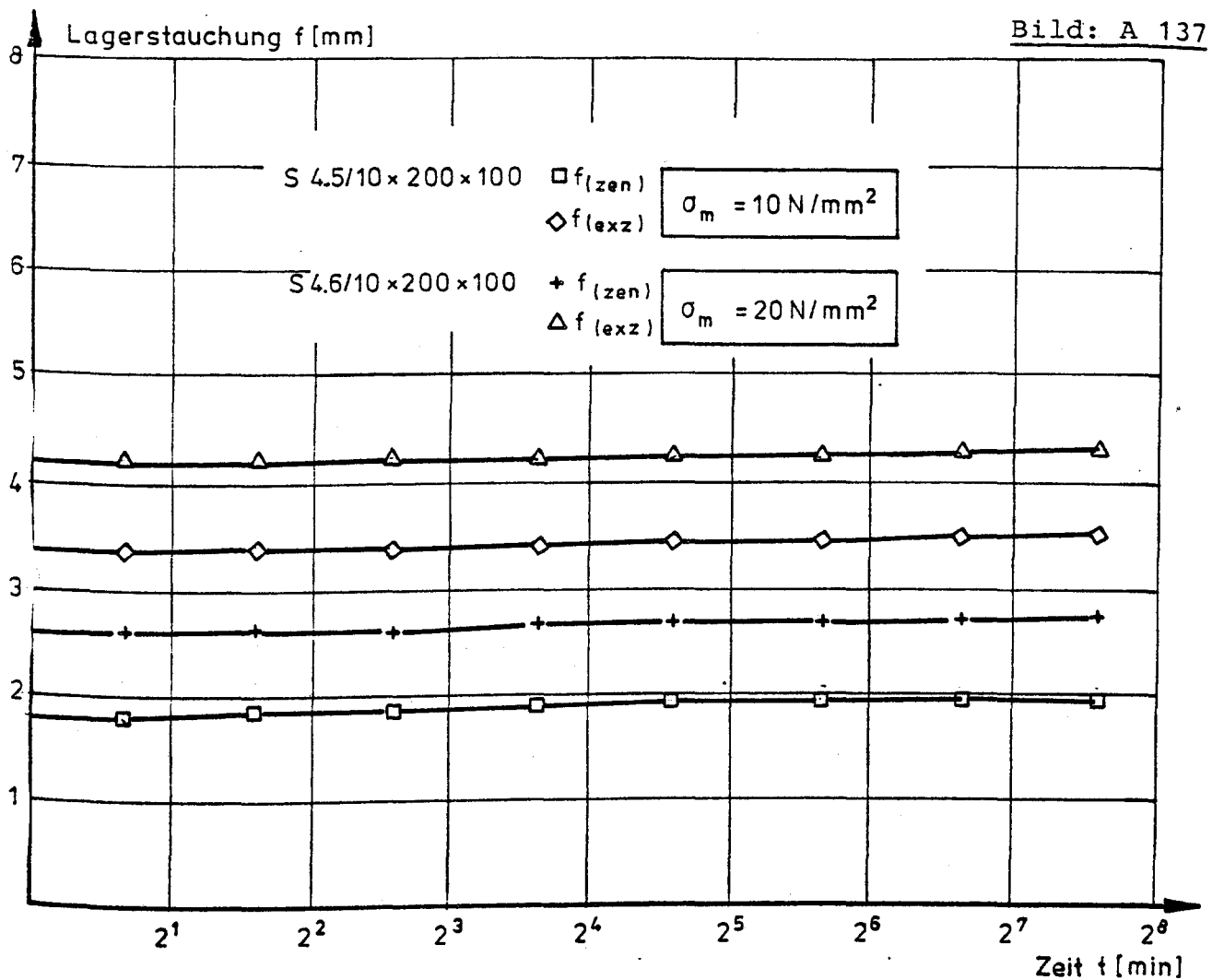


Bild: A 134





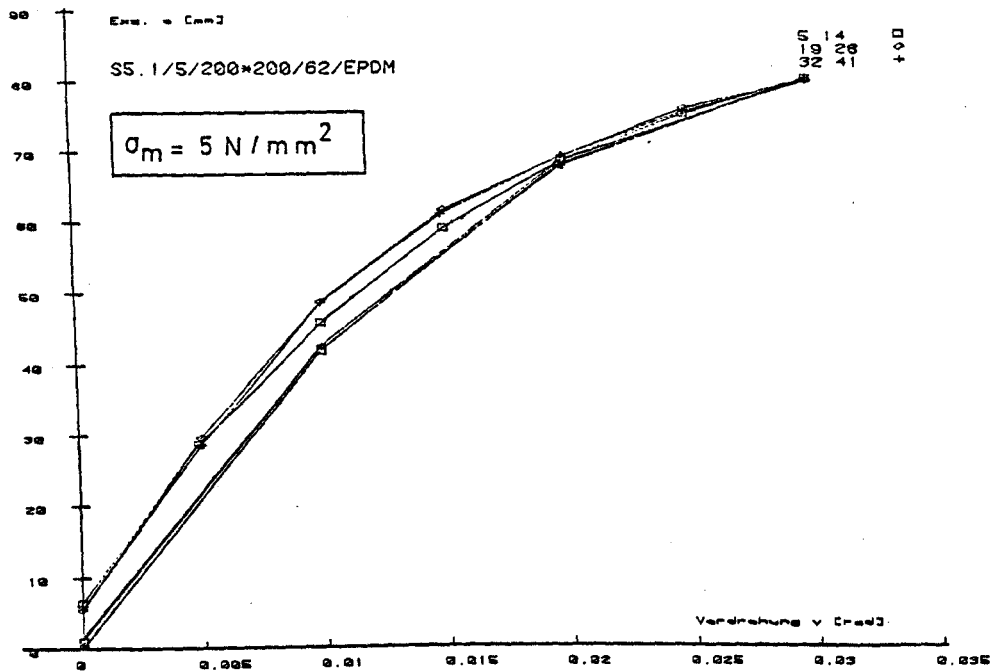


Bild: A 139

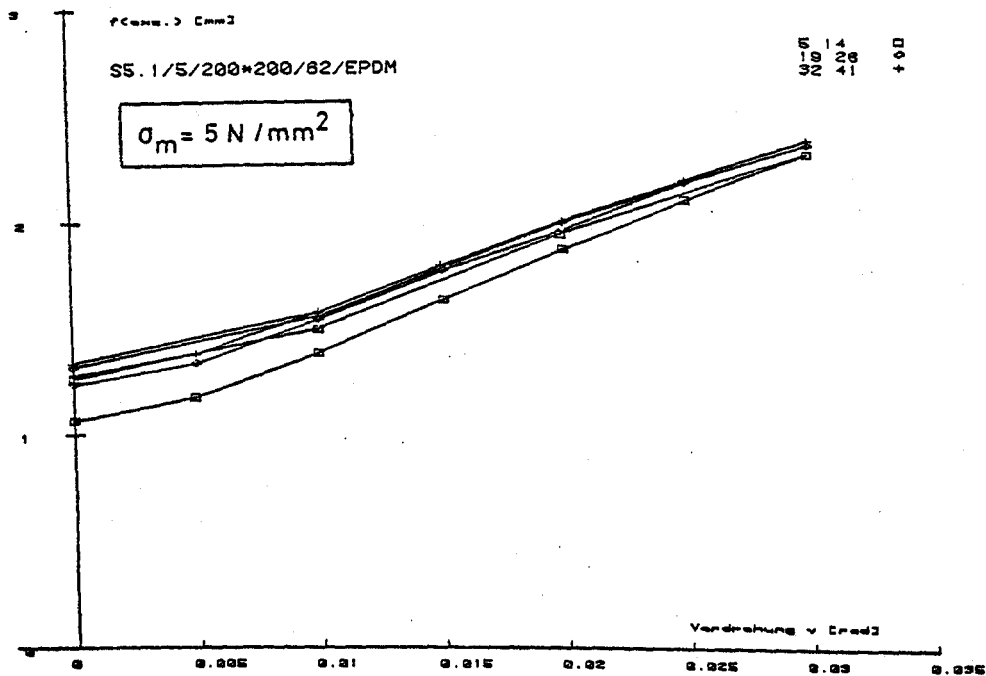


Bild: A 140

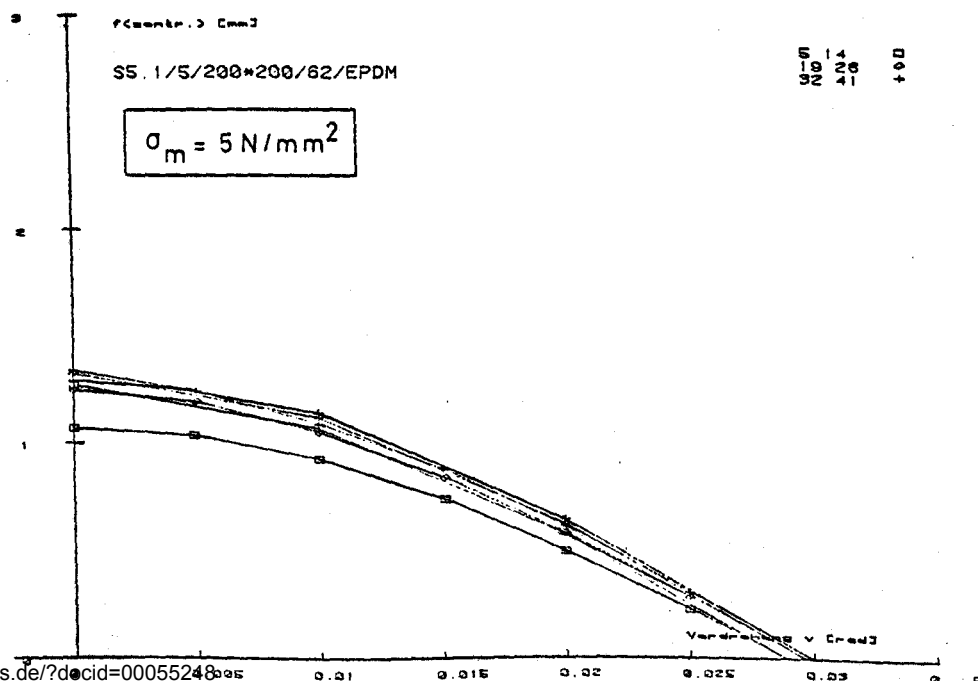


Bild: A 141

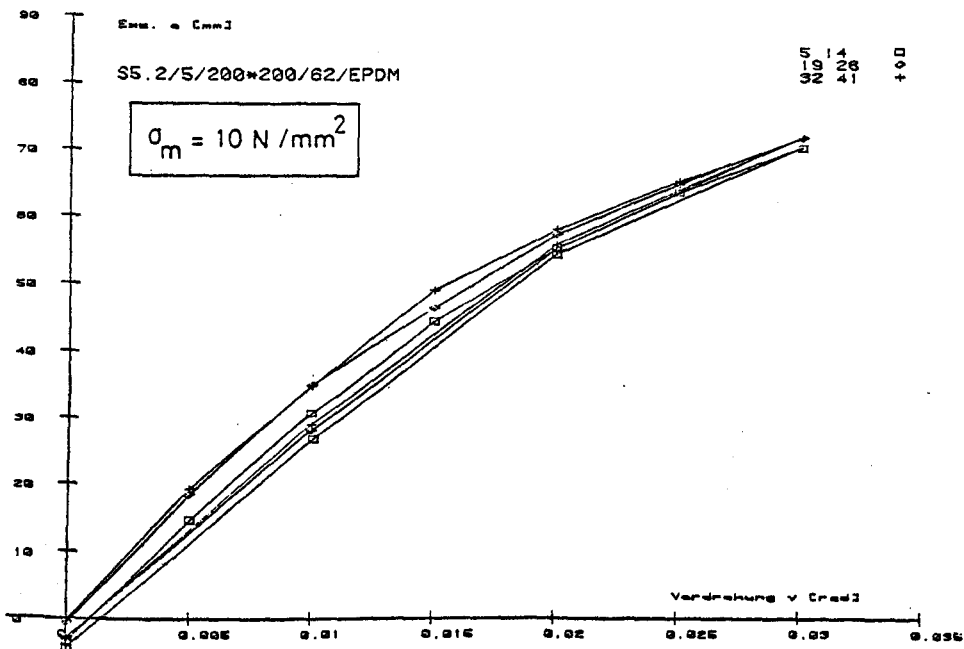


Bild: A 142

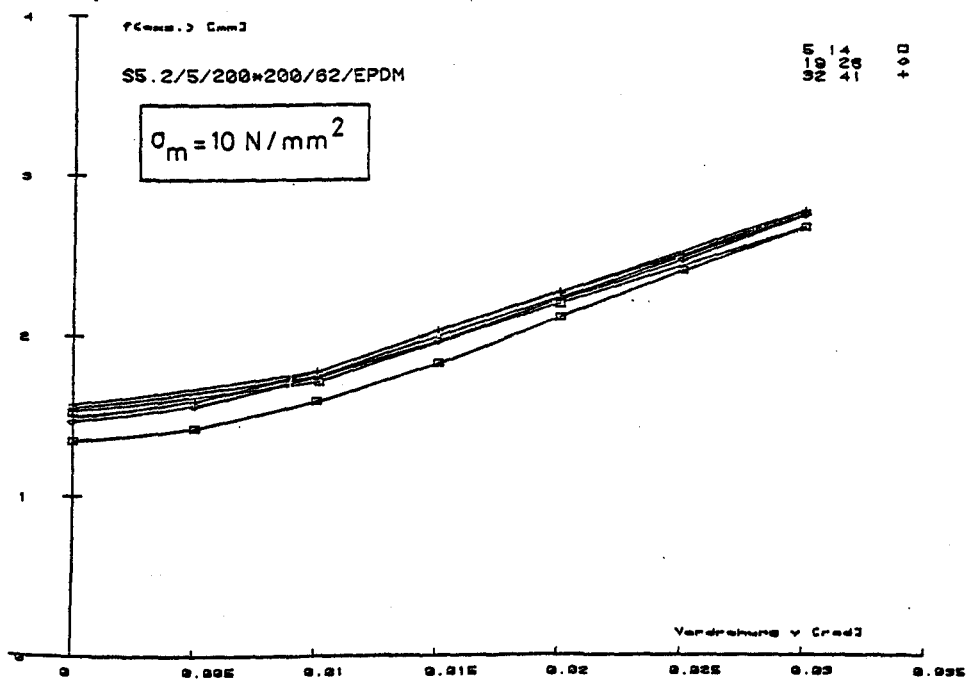


Bild: A 143

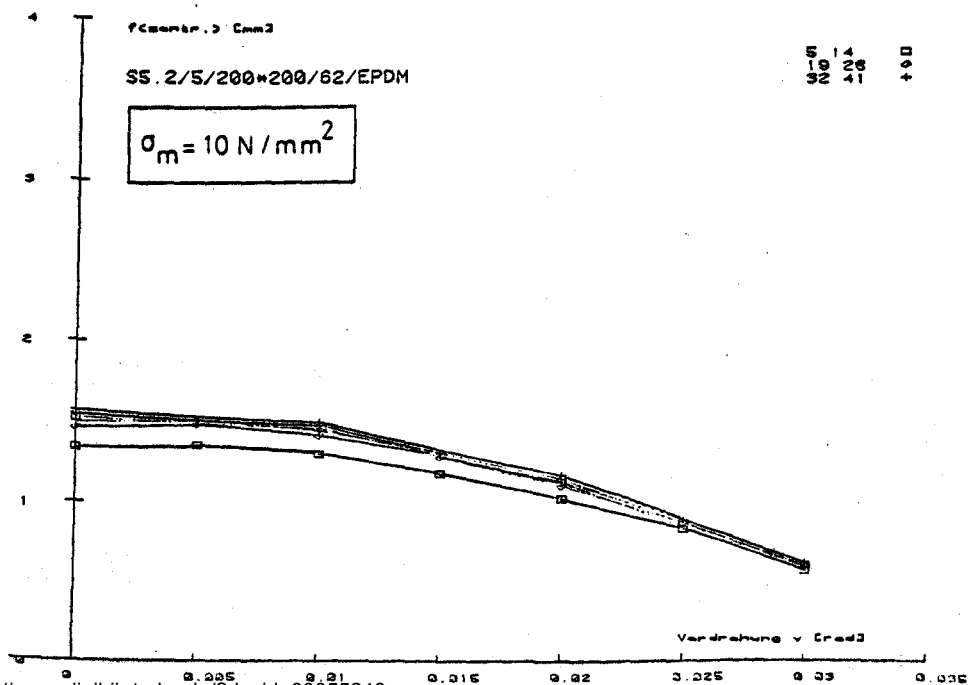


Bild: A 144

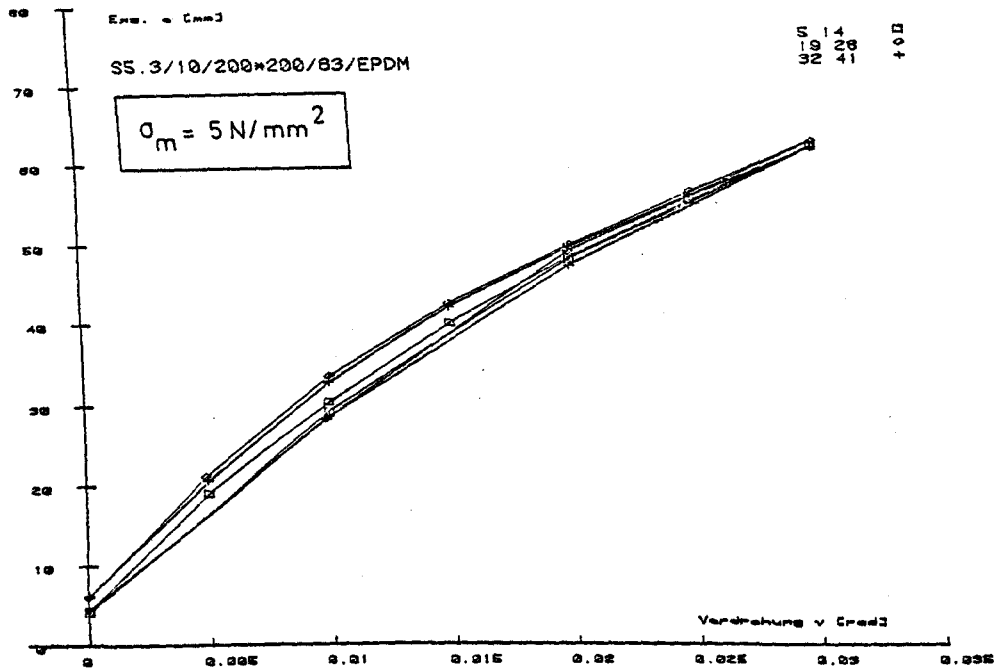


Bild: A 145

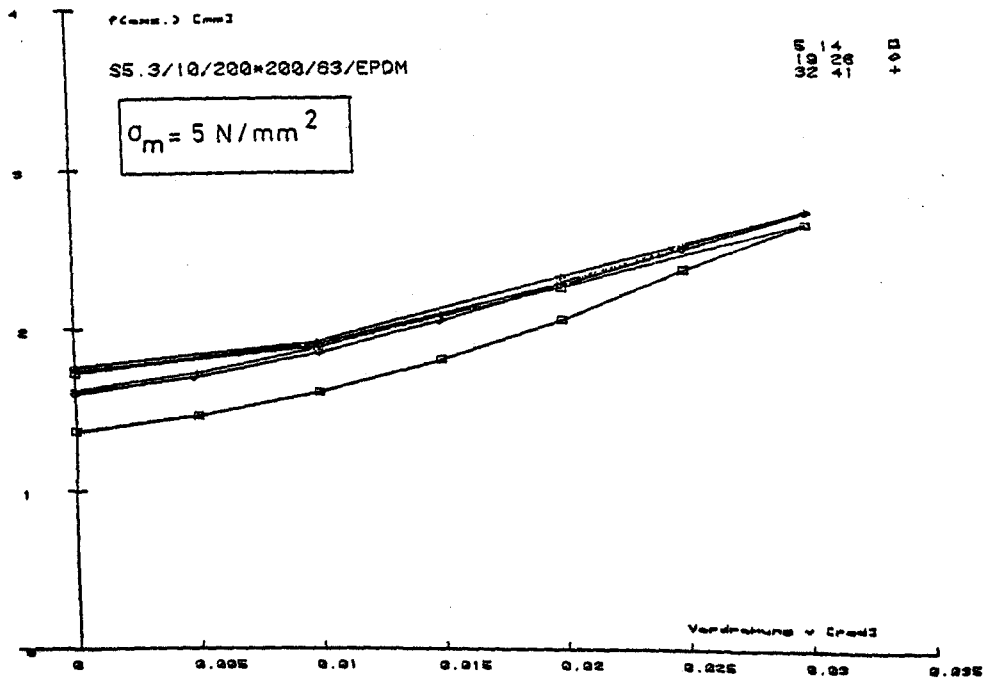


Bild: A 146

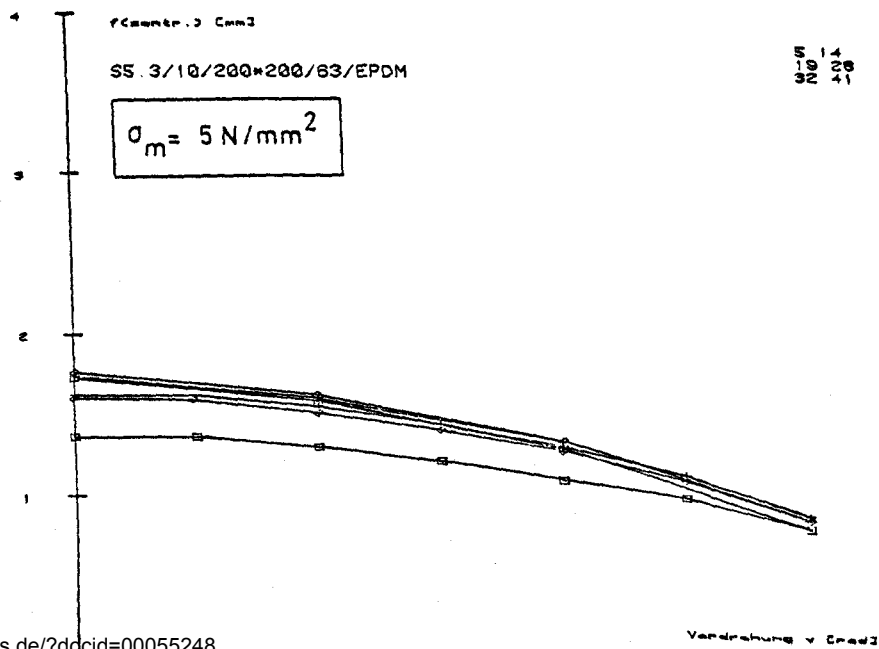


Bild: A 147

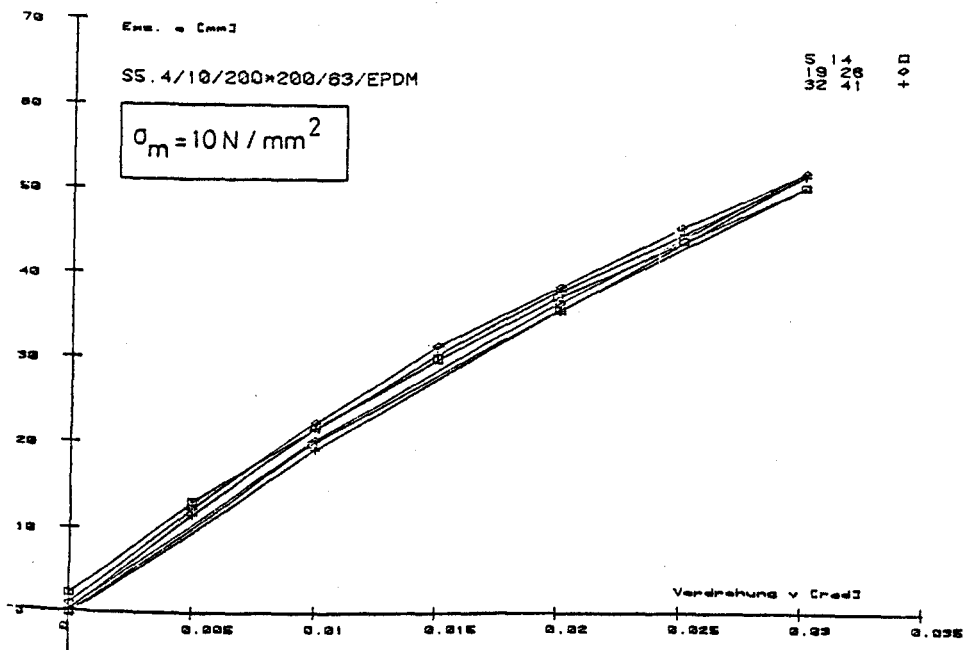


Bild: A 148

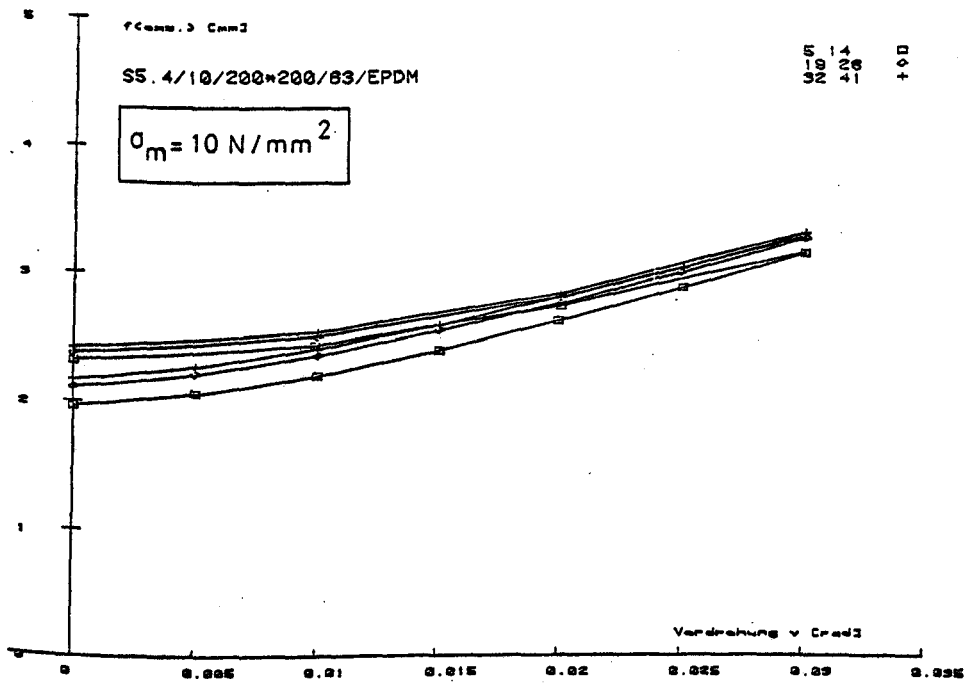


Bild: A 149

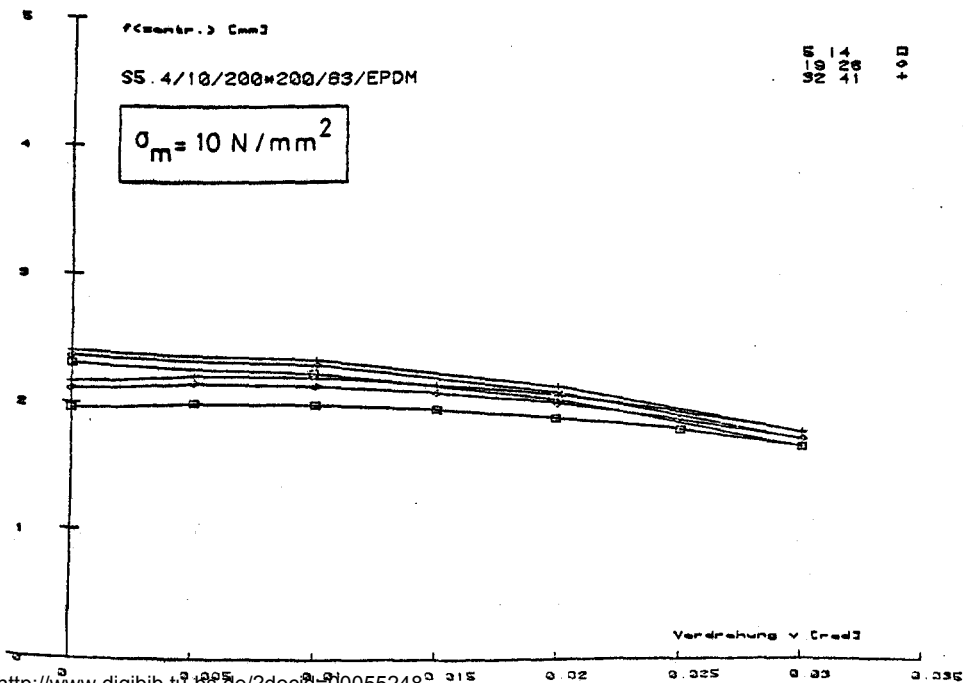


Bild: A 150

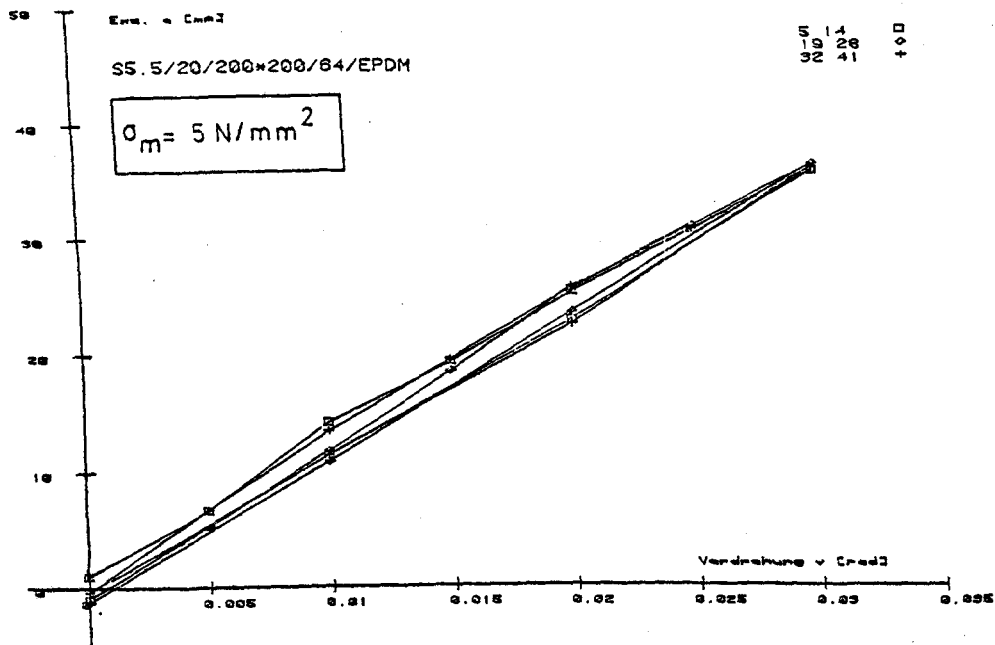


Bild: A 151

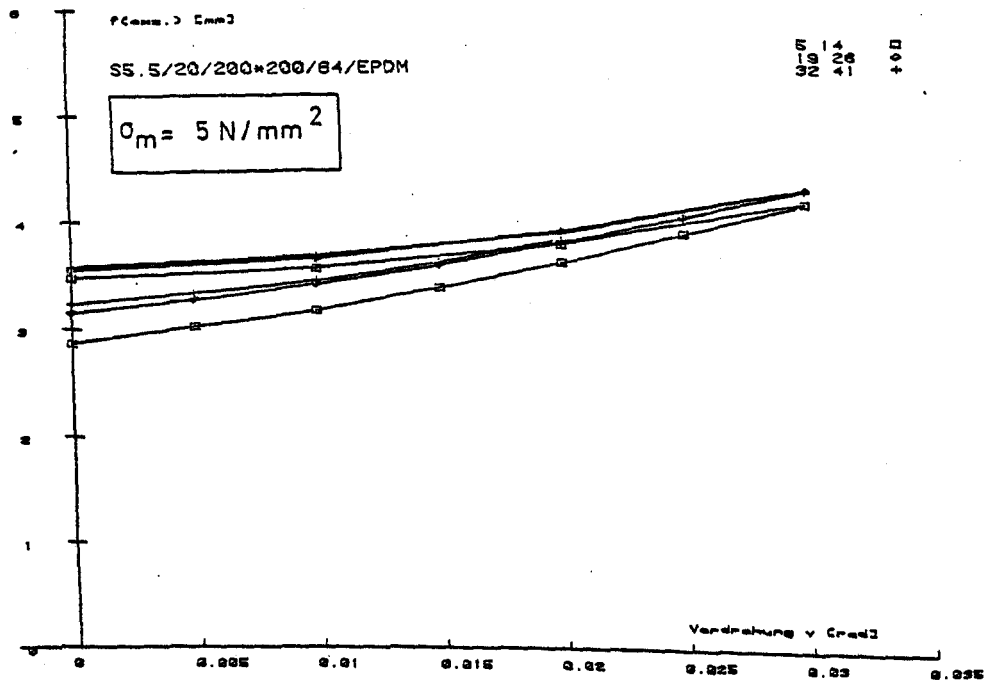


Bild: A 152

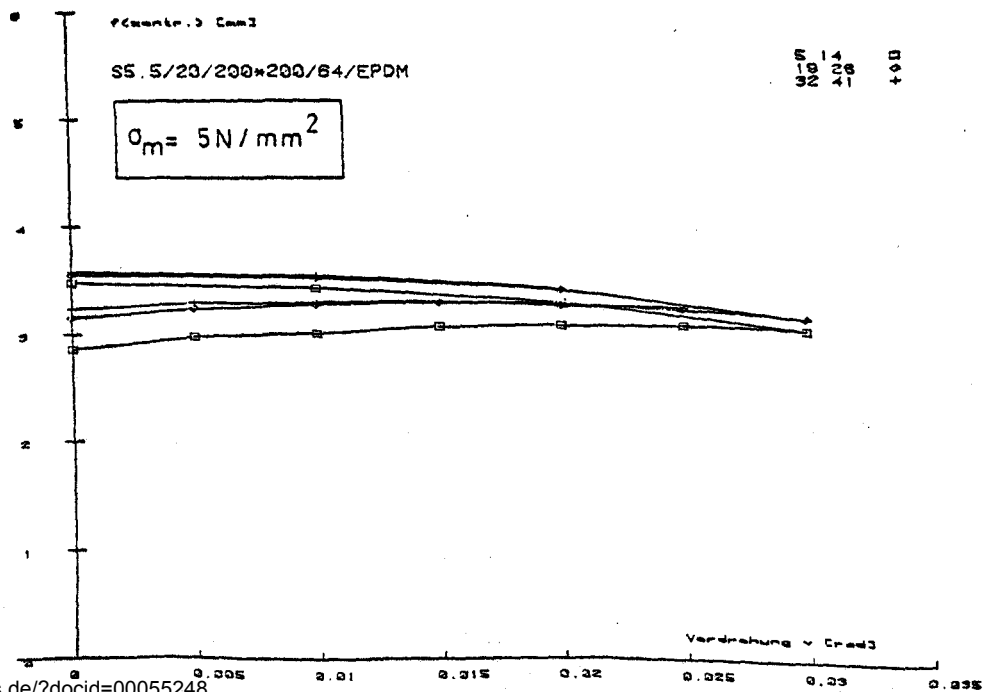


Bild: A 153

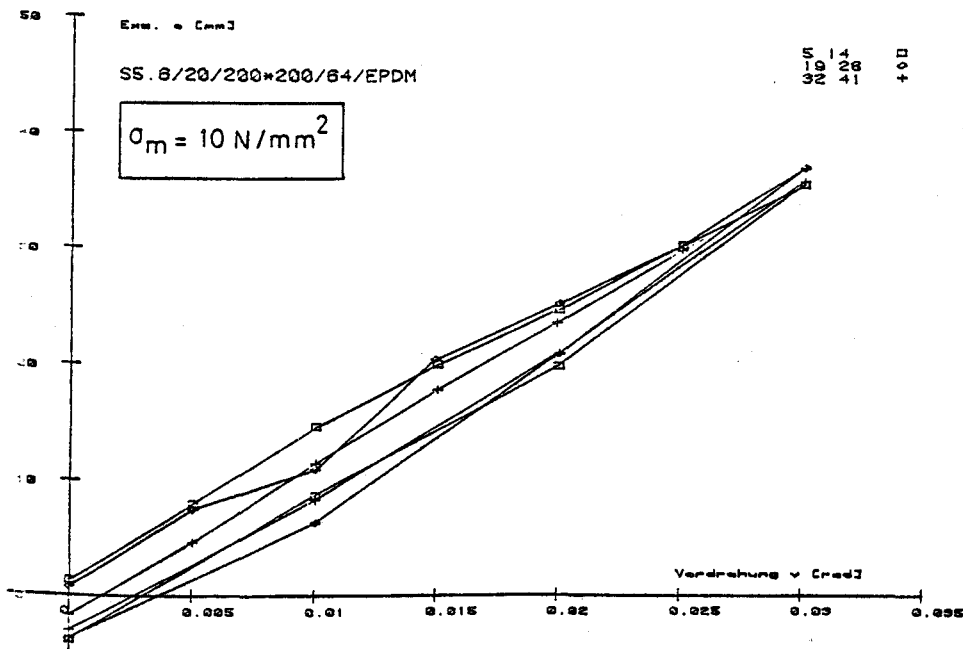


Bild: A 154

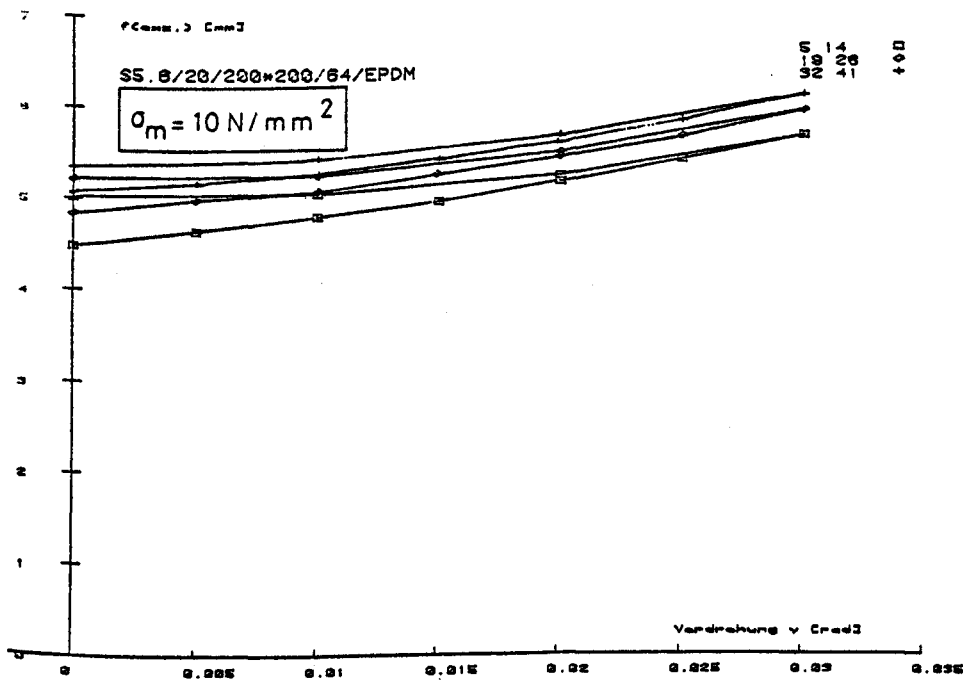


Bild: A 155

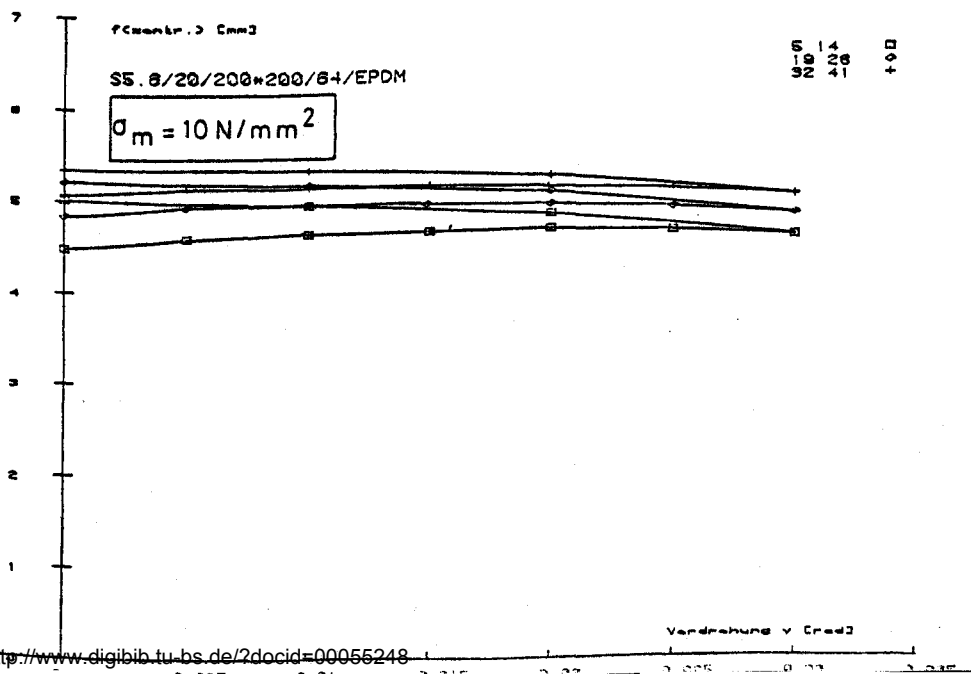


Bild: A 156

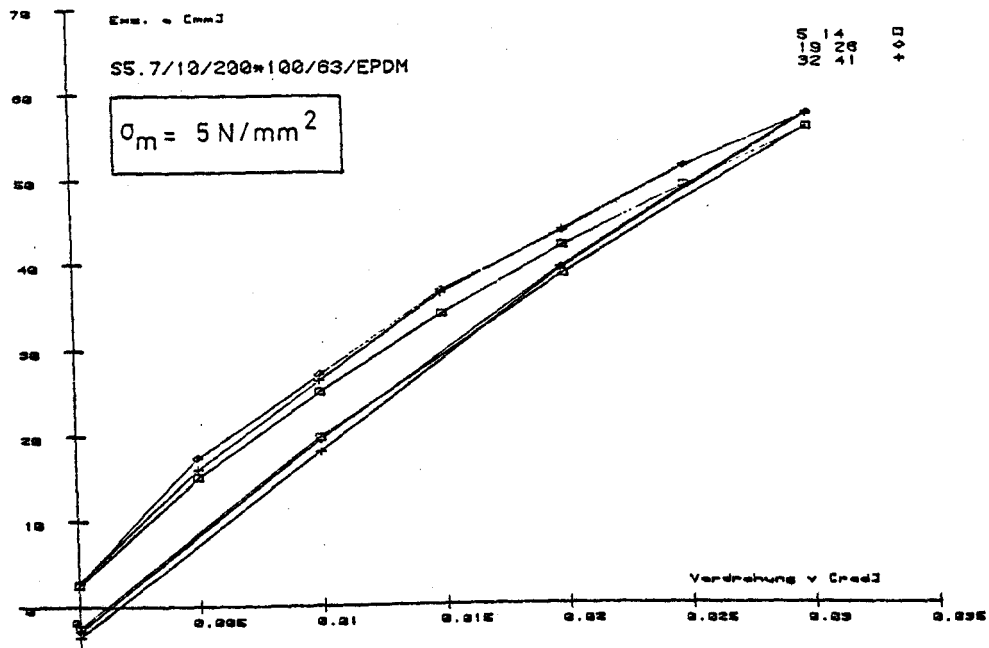


Bild: A 157

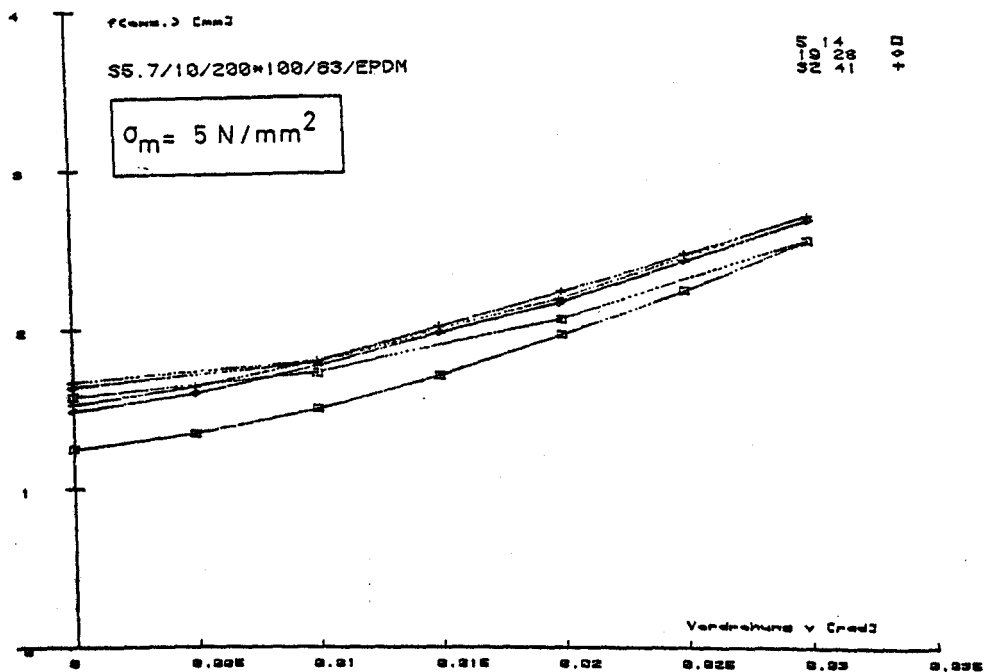


Bild: A 158

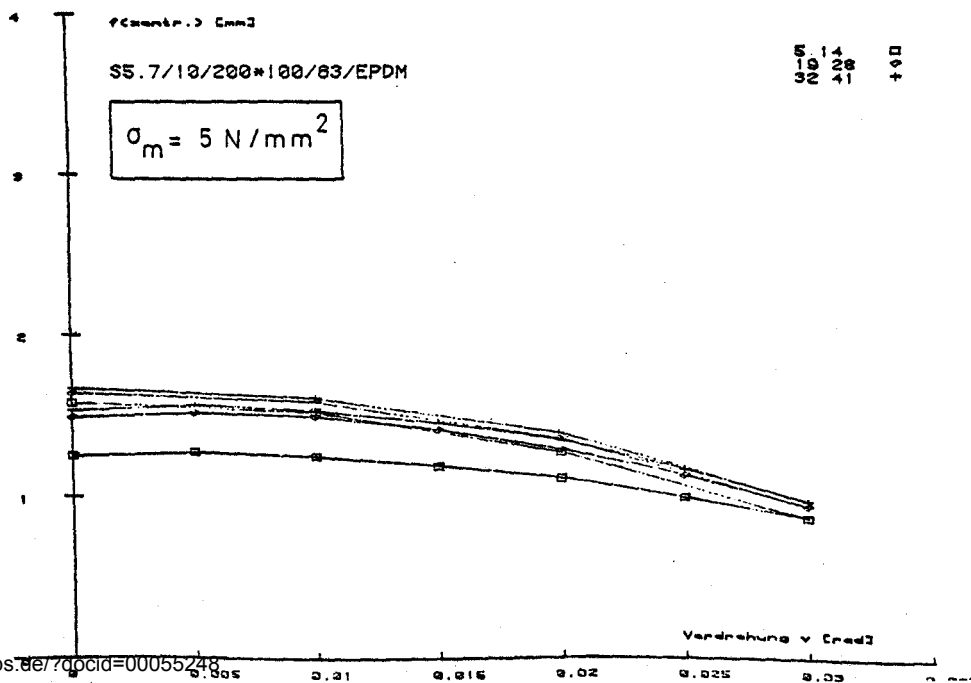


Bild: A 159

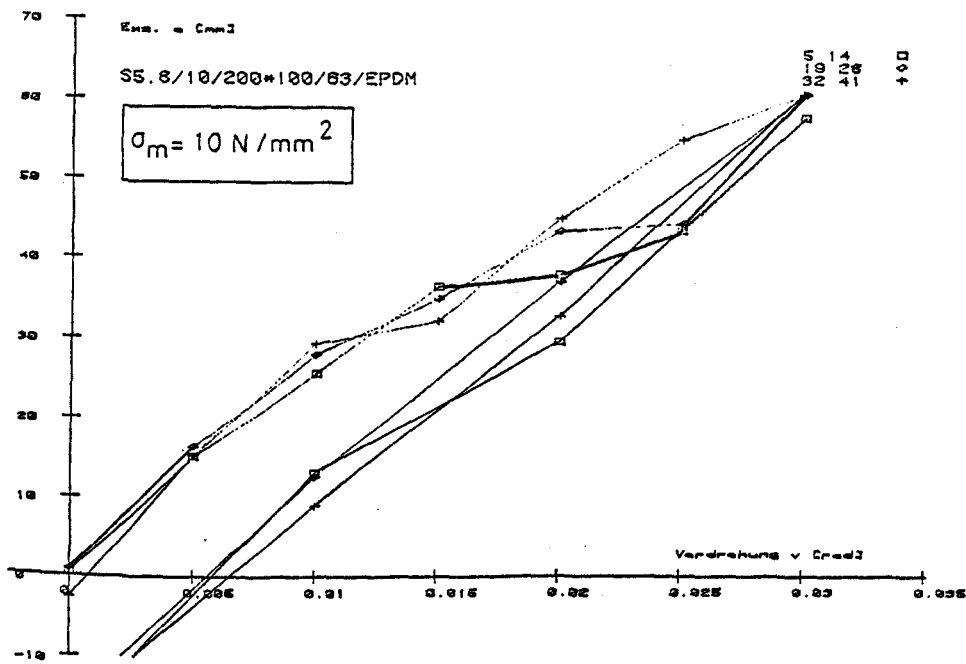


Bild: A 160

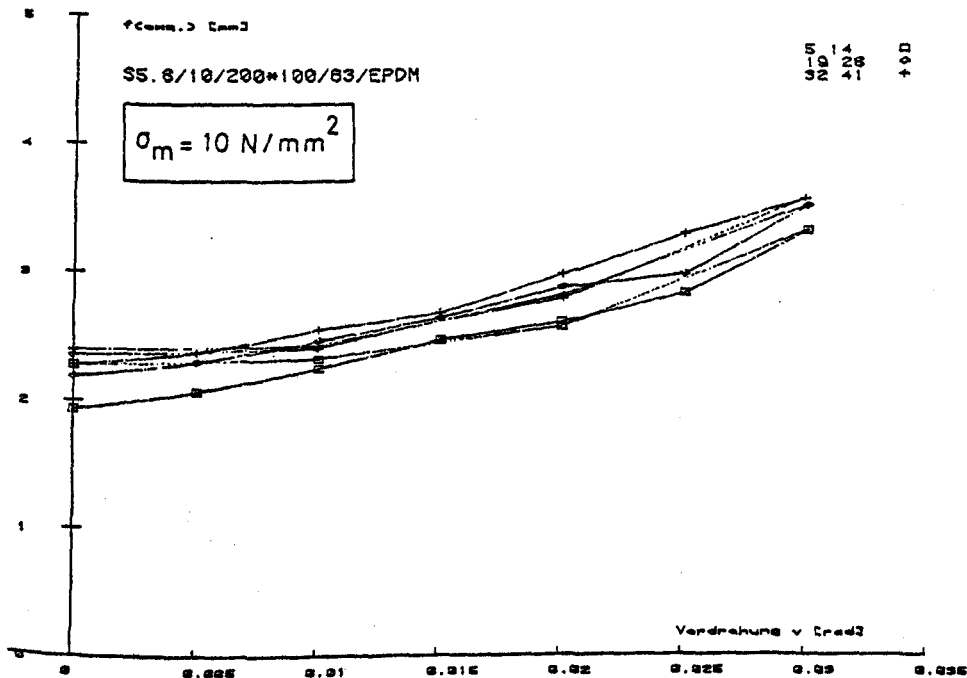


Bild: A 161

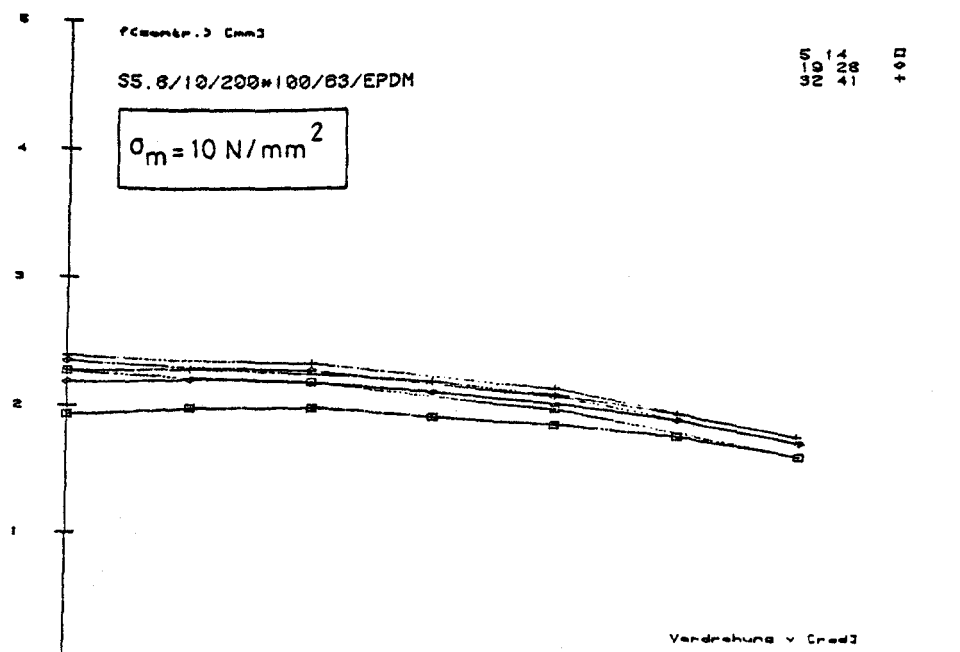


Bild: A 162

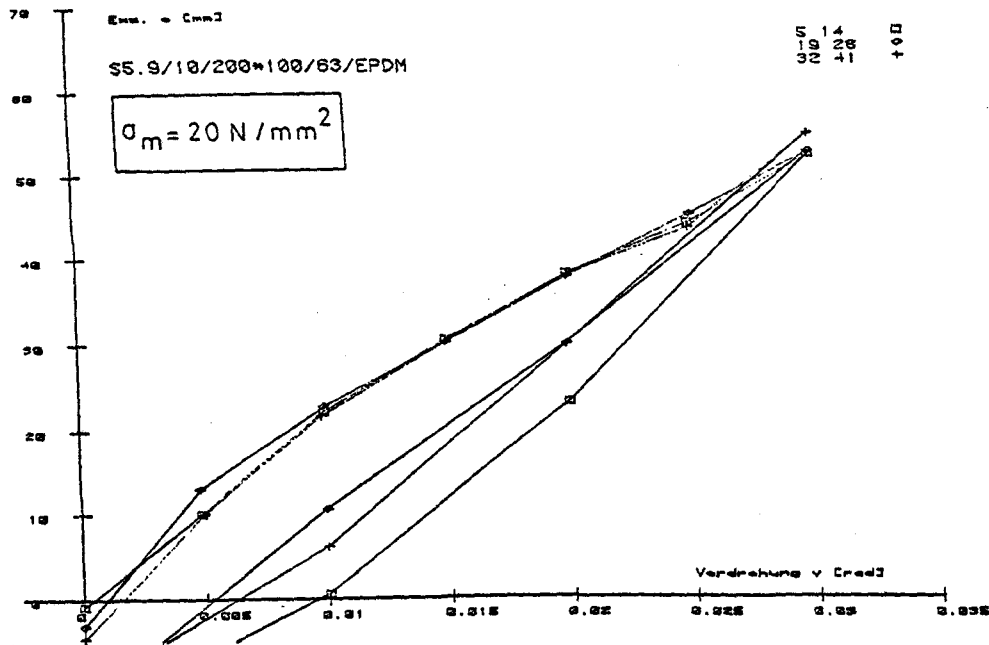


Bild: A 163

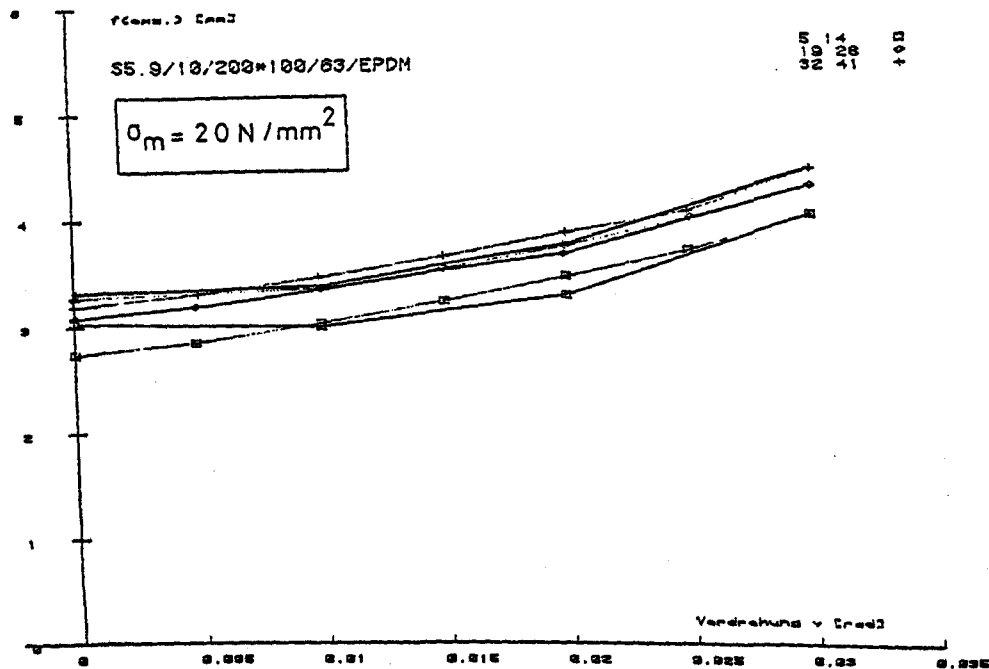


Bild: A 164

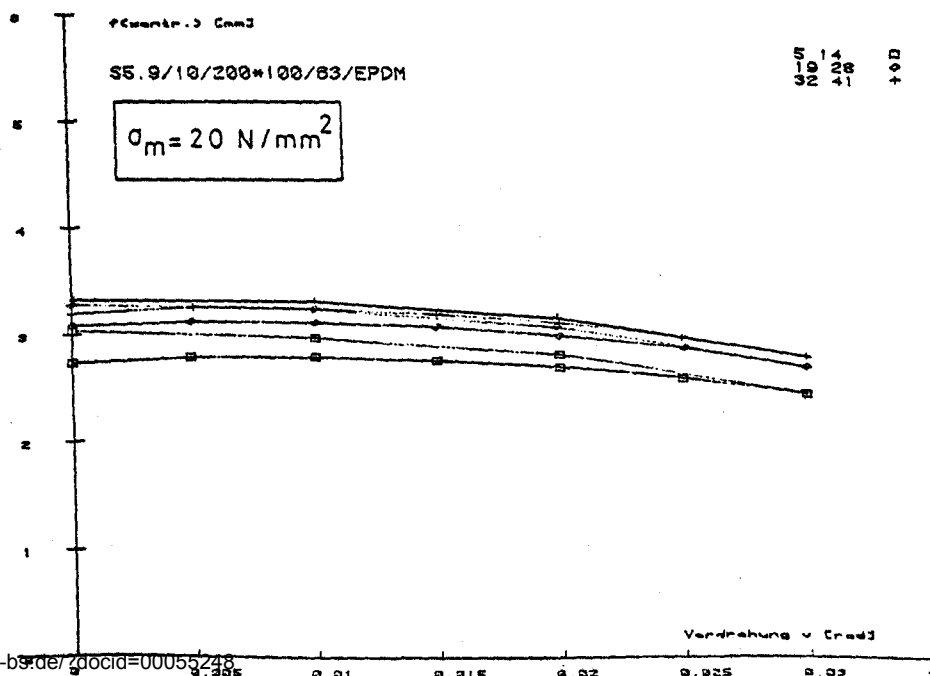


Bild: A 165

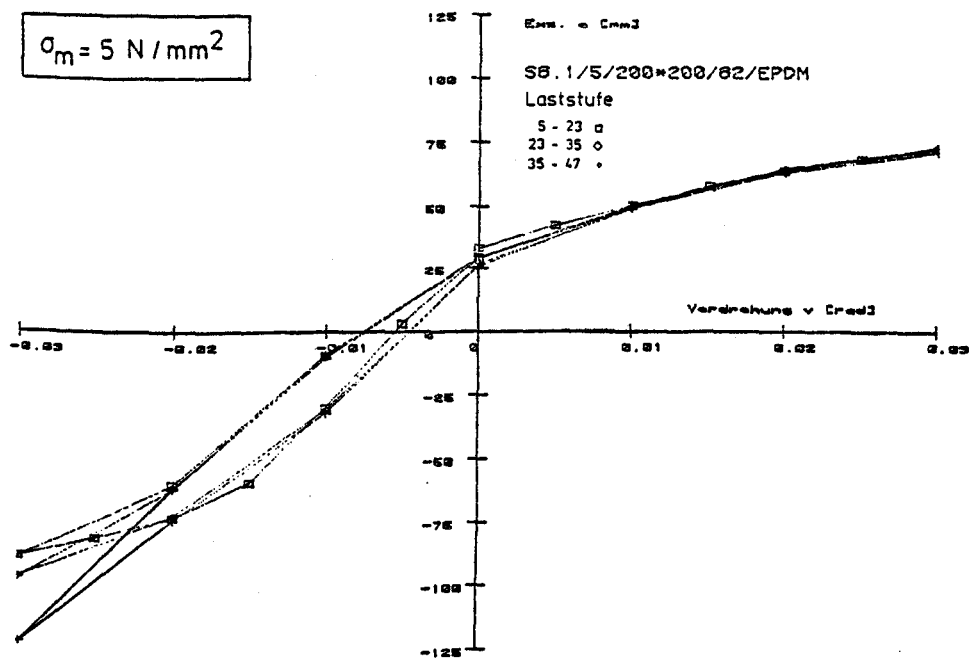


Bild: A 166

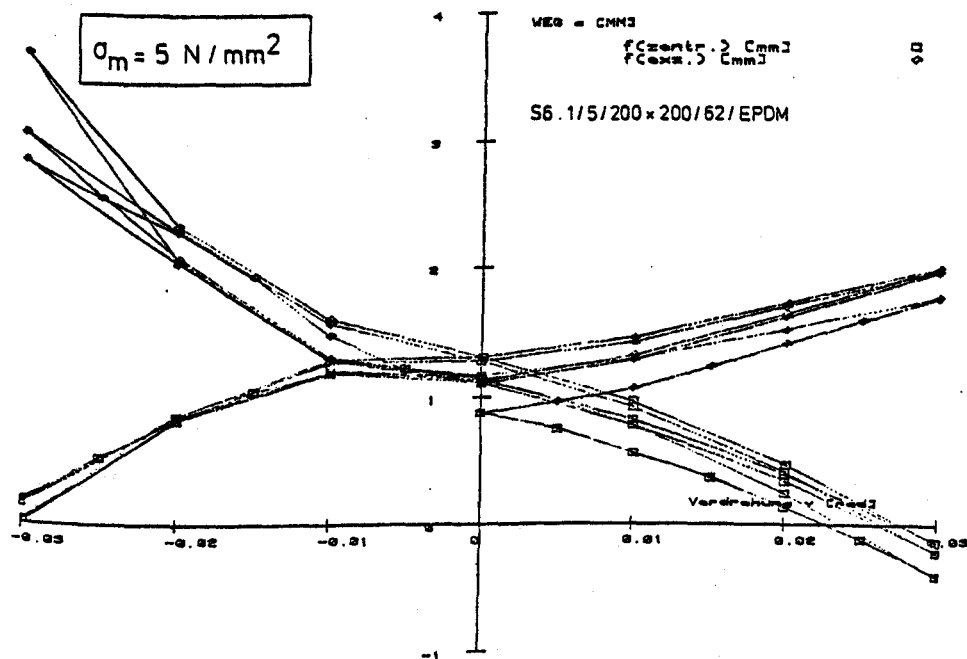


Bild: A 167

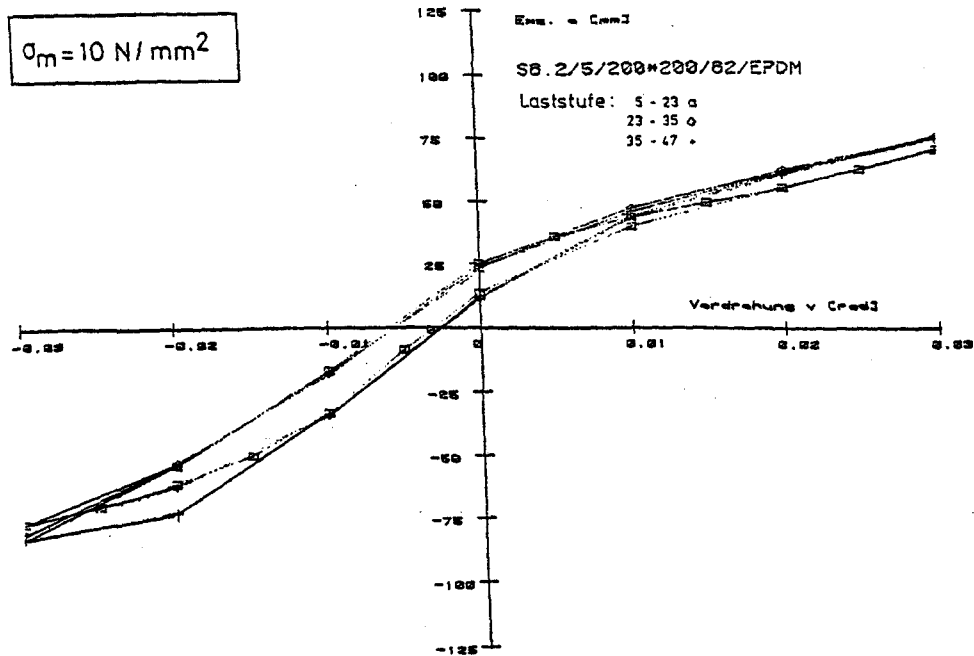


Bild: A 168

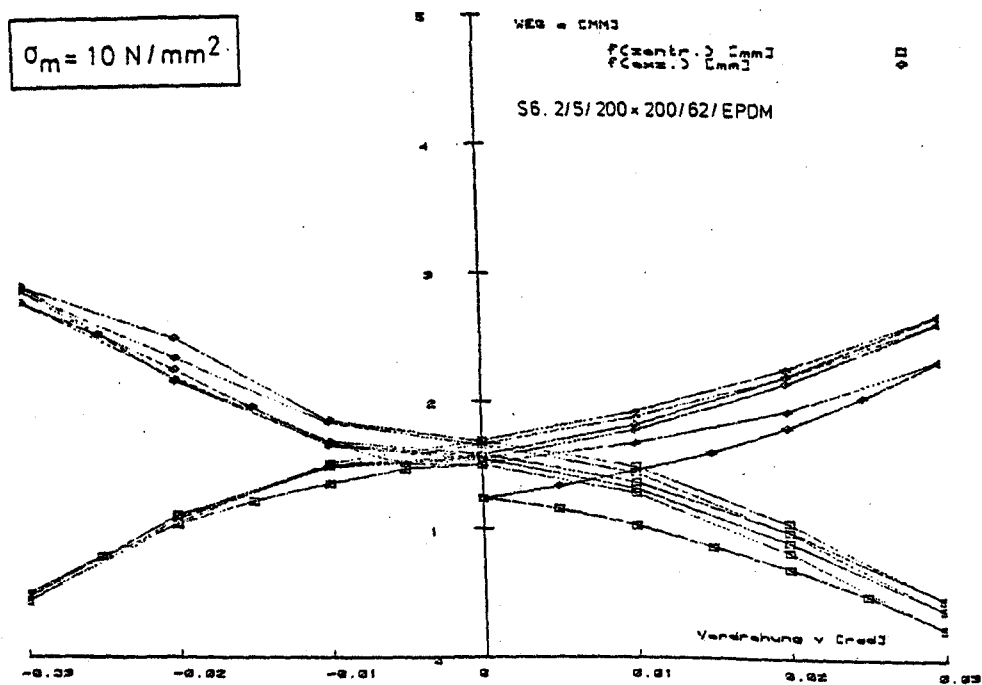


Bild: A 169

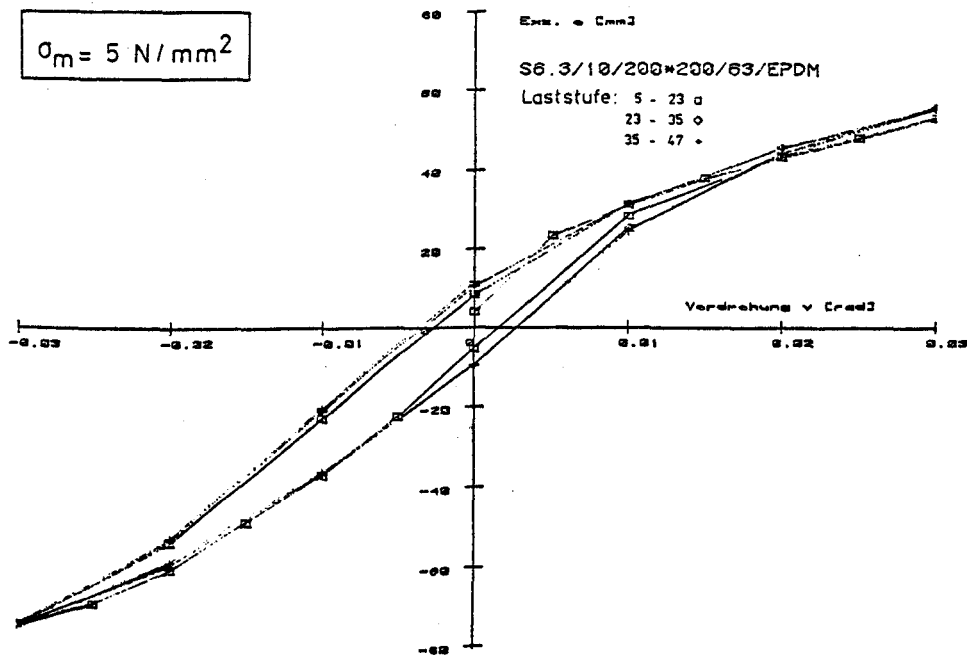


Bild: A 170

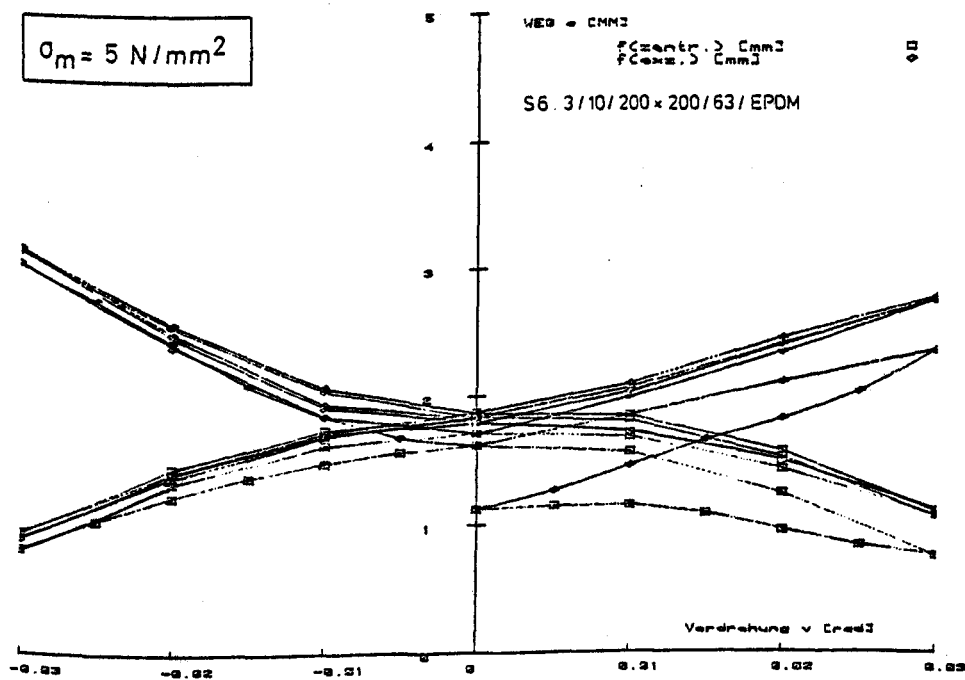


Bild: A 171

$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$

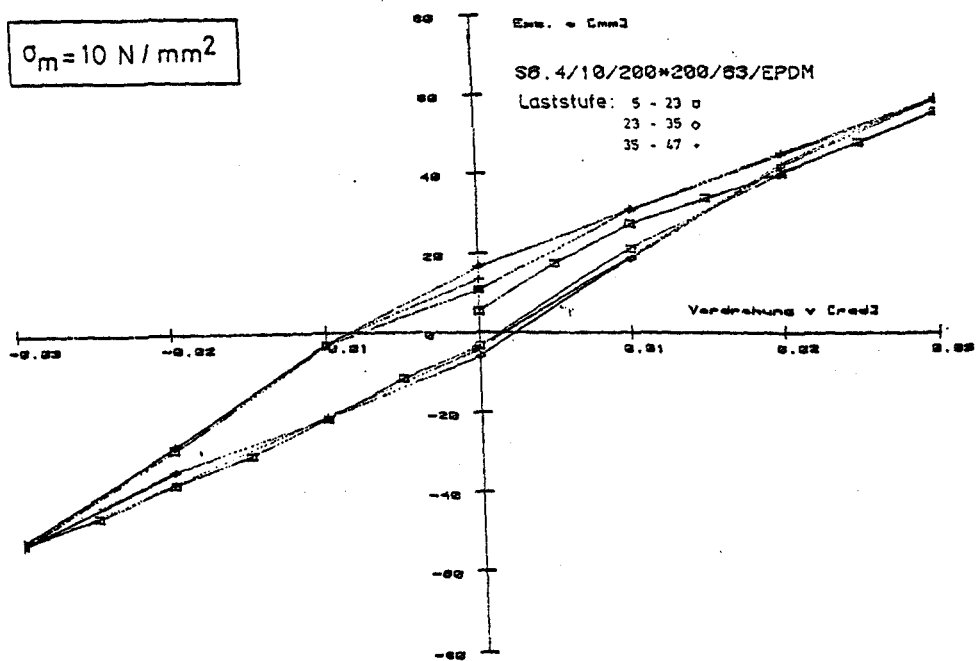


Bild: A

$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$

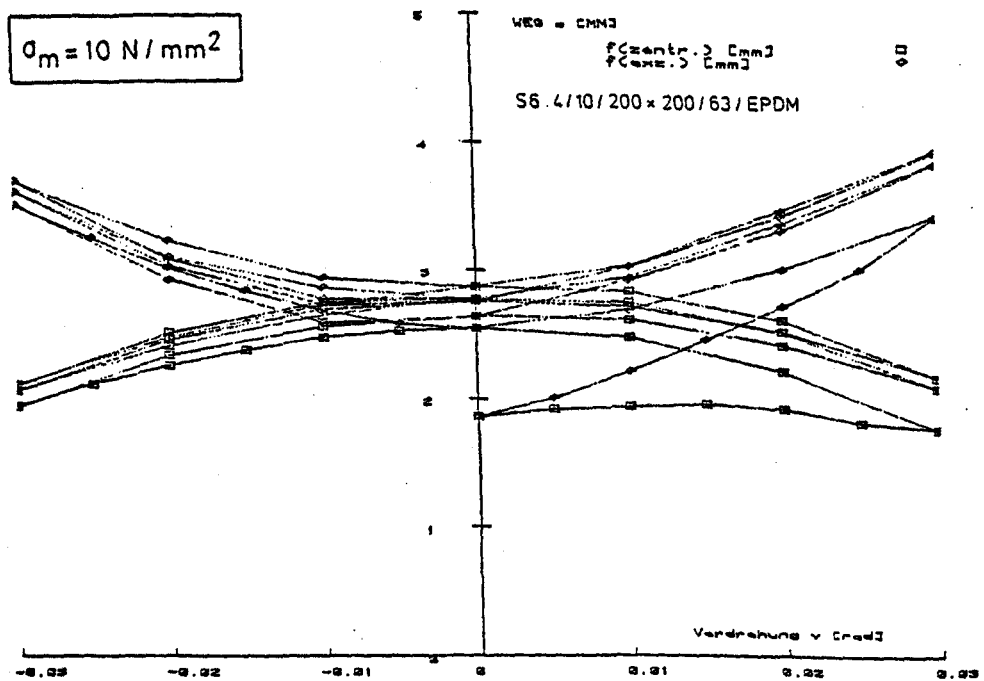


Bild: A

$$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$$

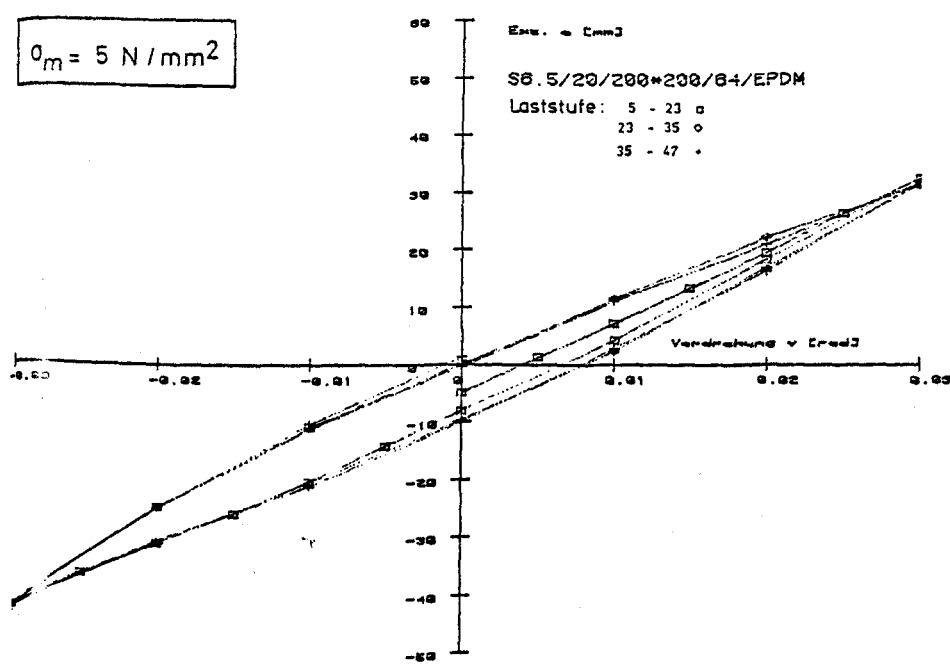


Bild: A 174

$$c_n = 5 \text{ N/mm}^2$$

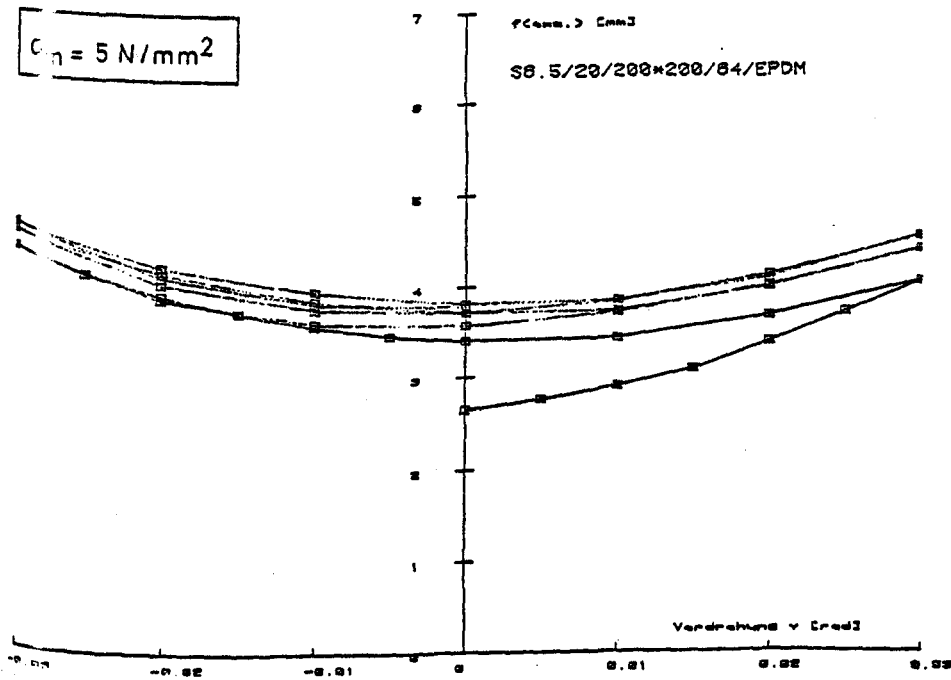


Bild: A 175

$$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$$

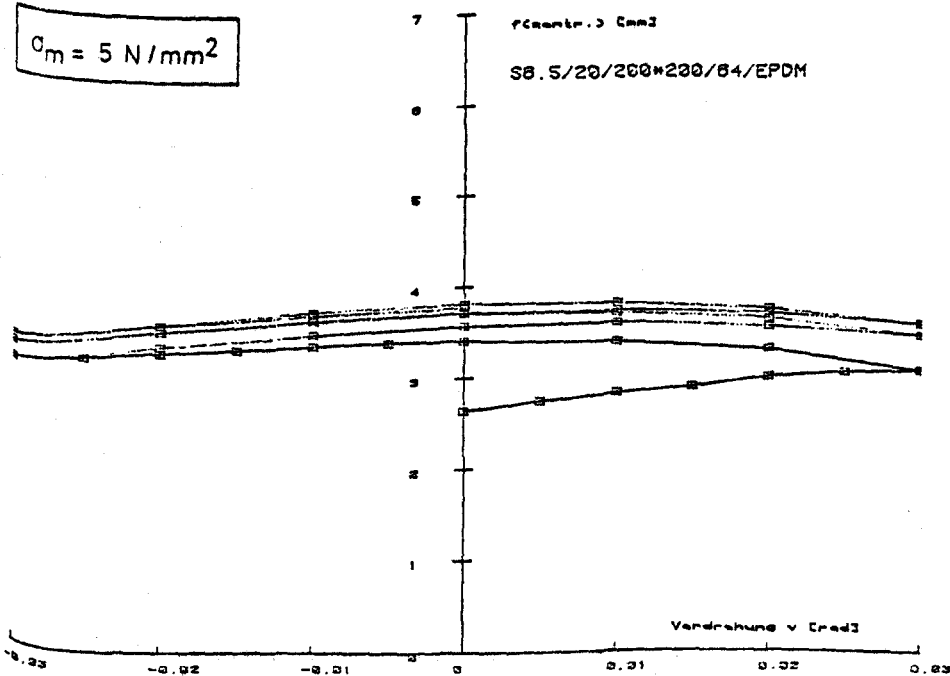


Bild: A 176

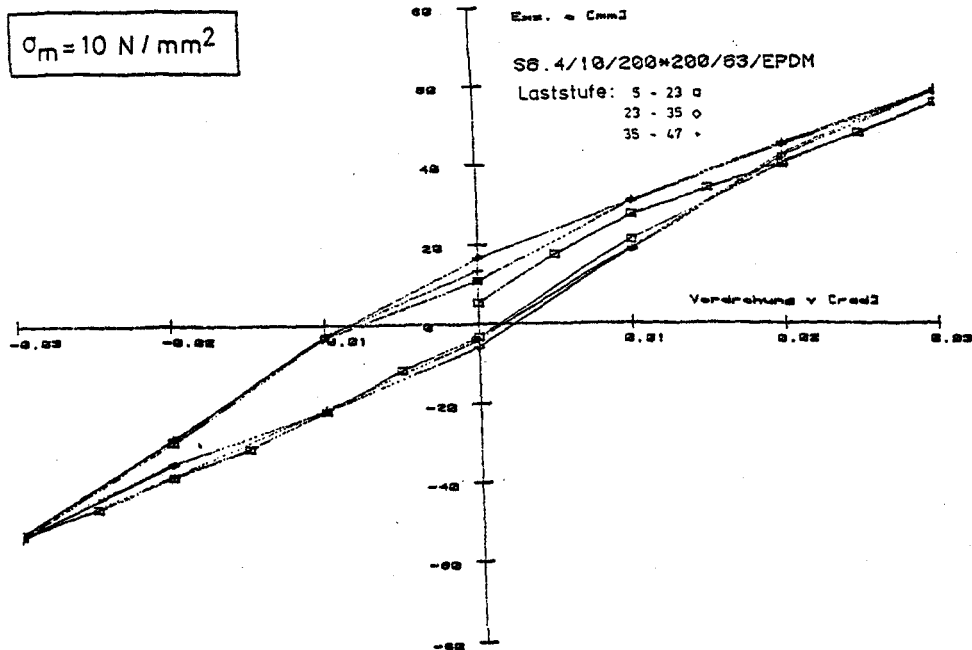


Bild: A 172

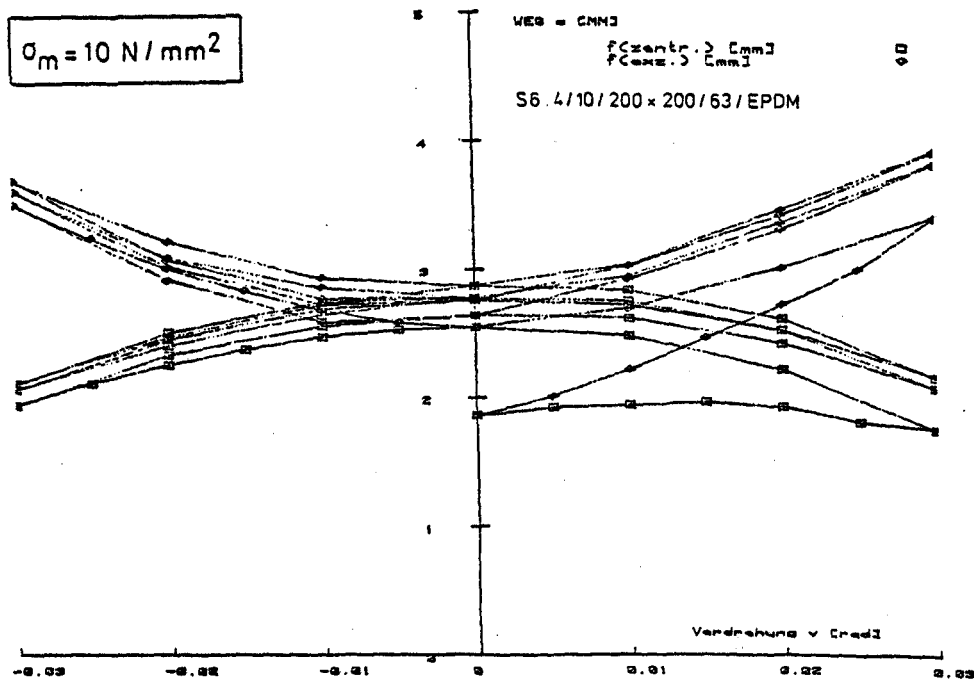


Bild: A 173

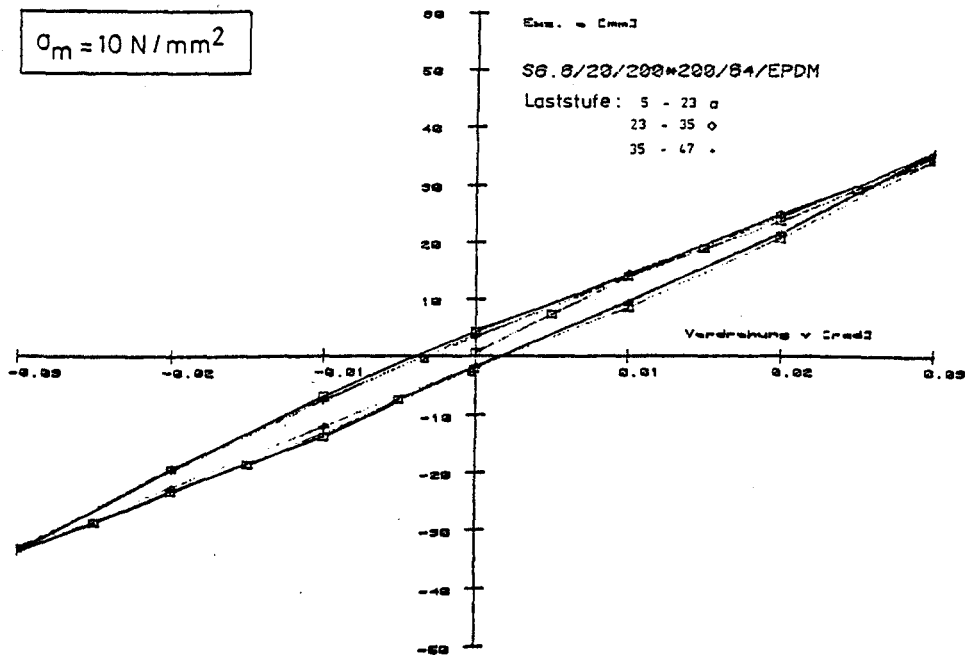


Bild: A 177

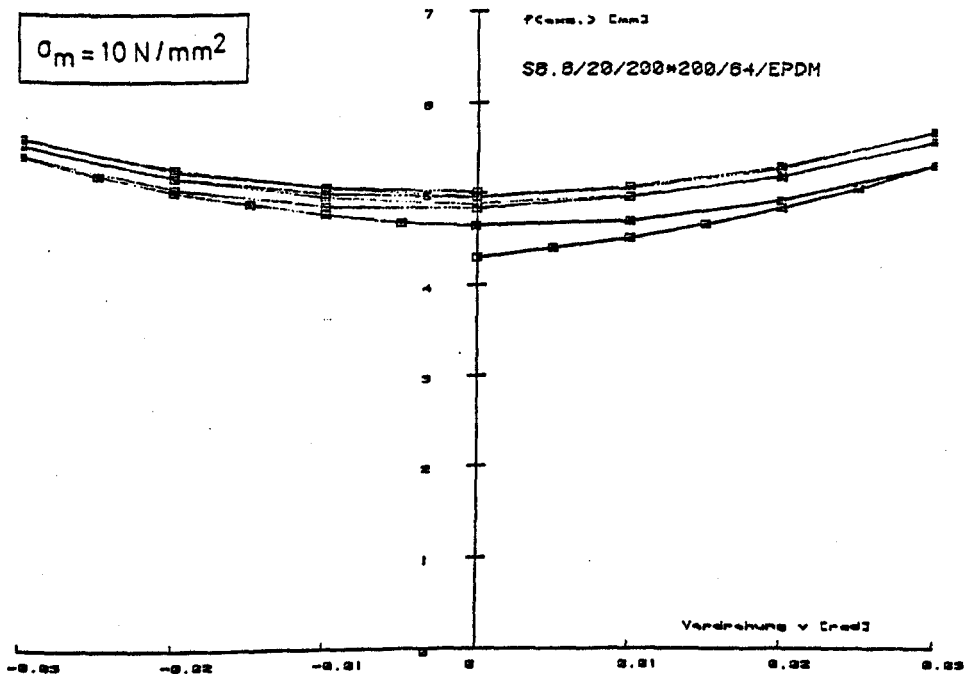


Bild: A 178

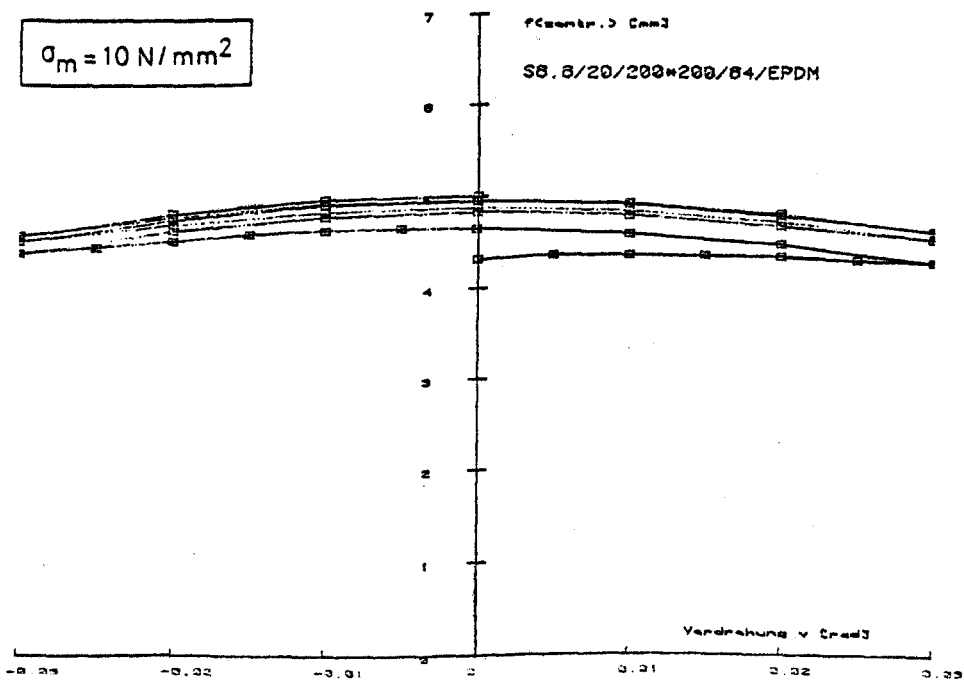


Bild: A 179

$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$

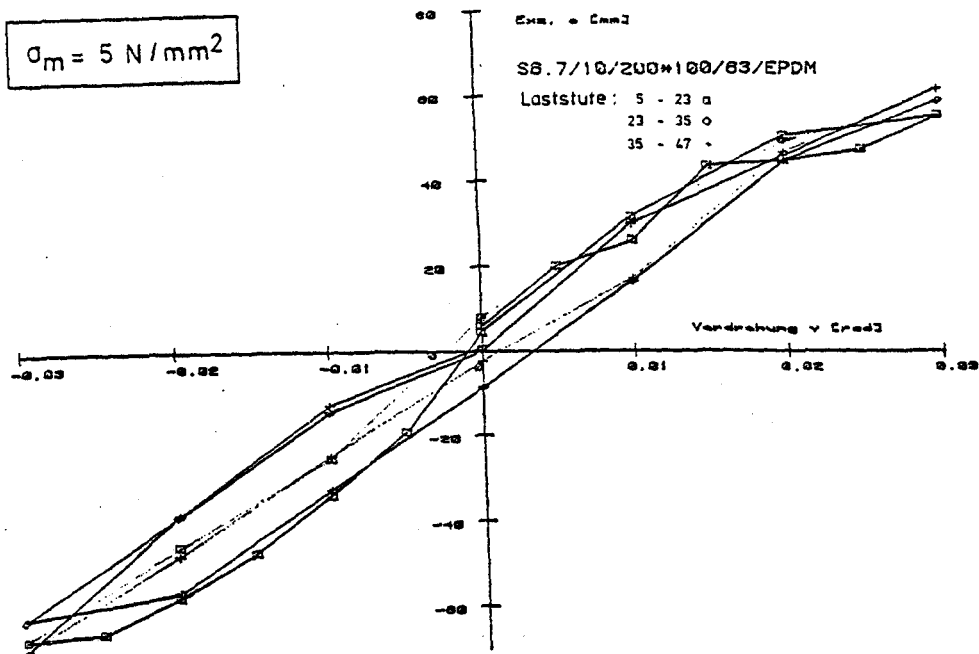


Bild: A 180

$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$

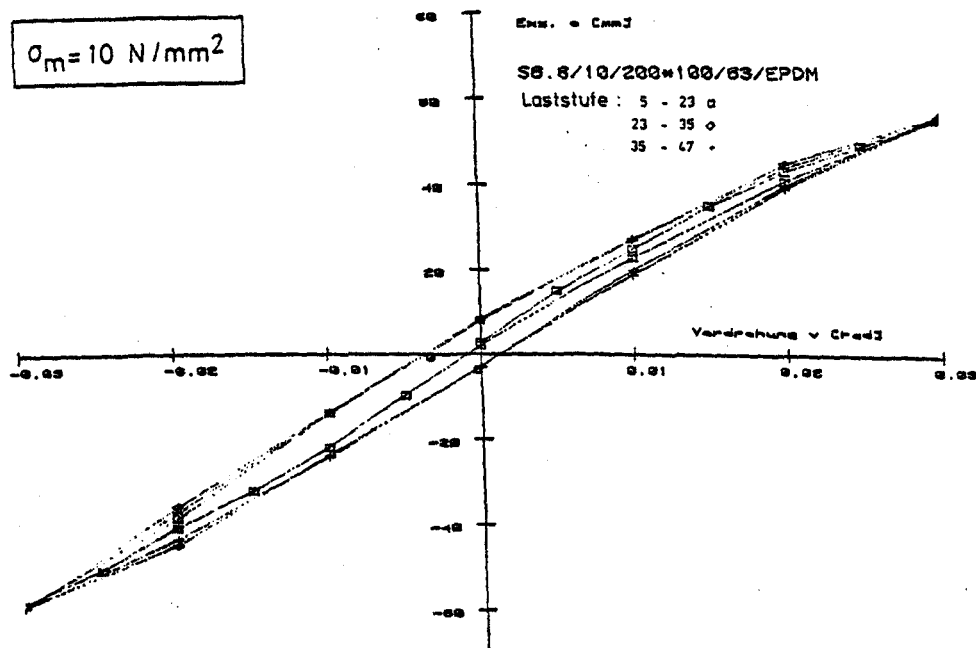


Bild: A 181

$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$

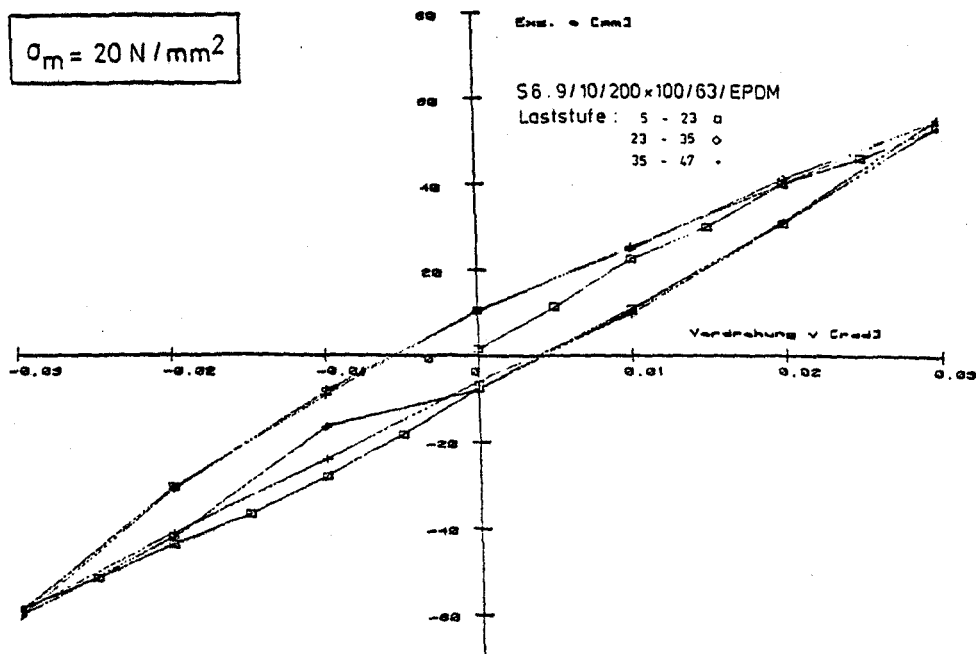


Bild: A 182

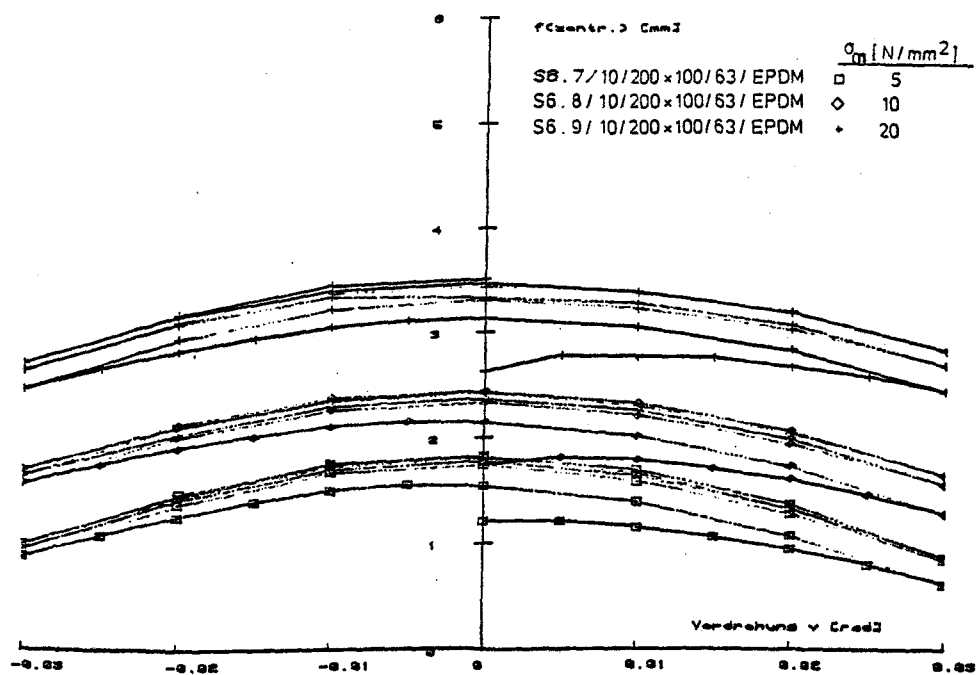


Bild: A 183

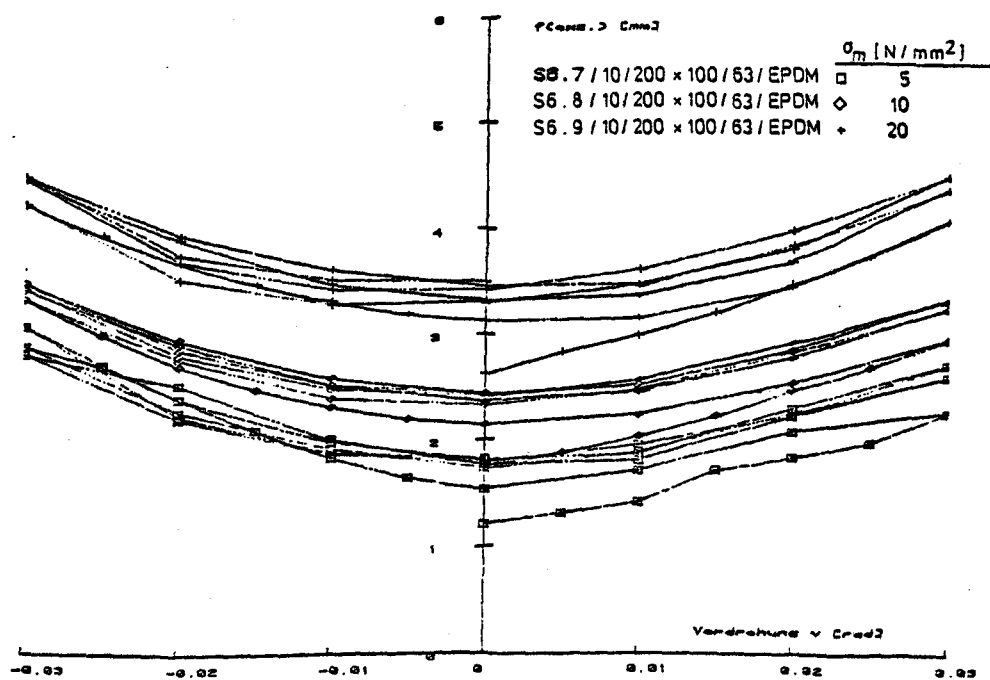


Bild: A 184

$\sigma_m = 5 \text{ N/mm}^2$

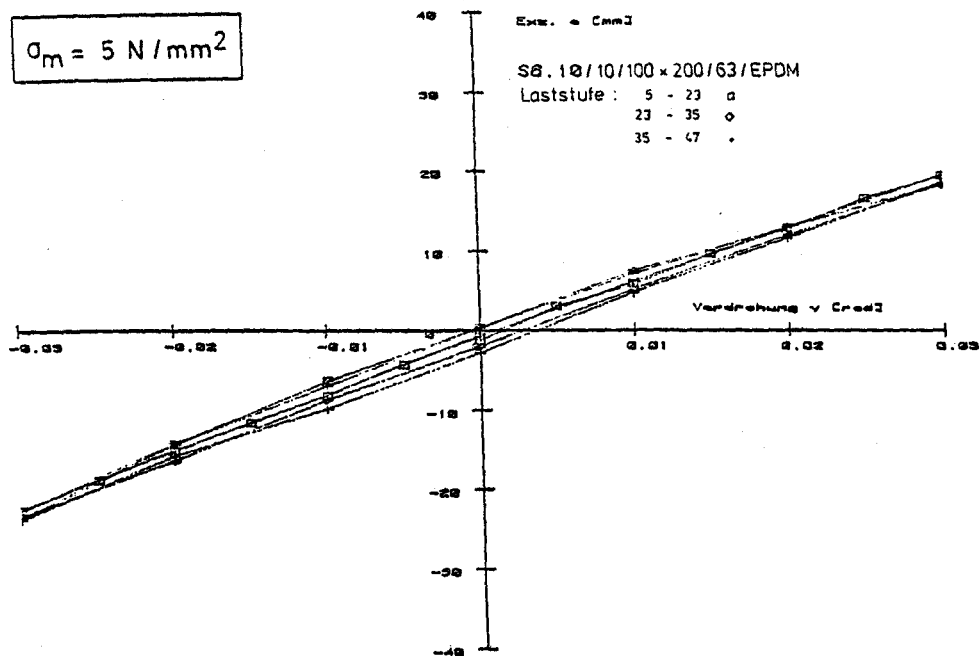


Bild: A 185

$\sigma_m = 10 \text{ N/mm}^2$

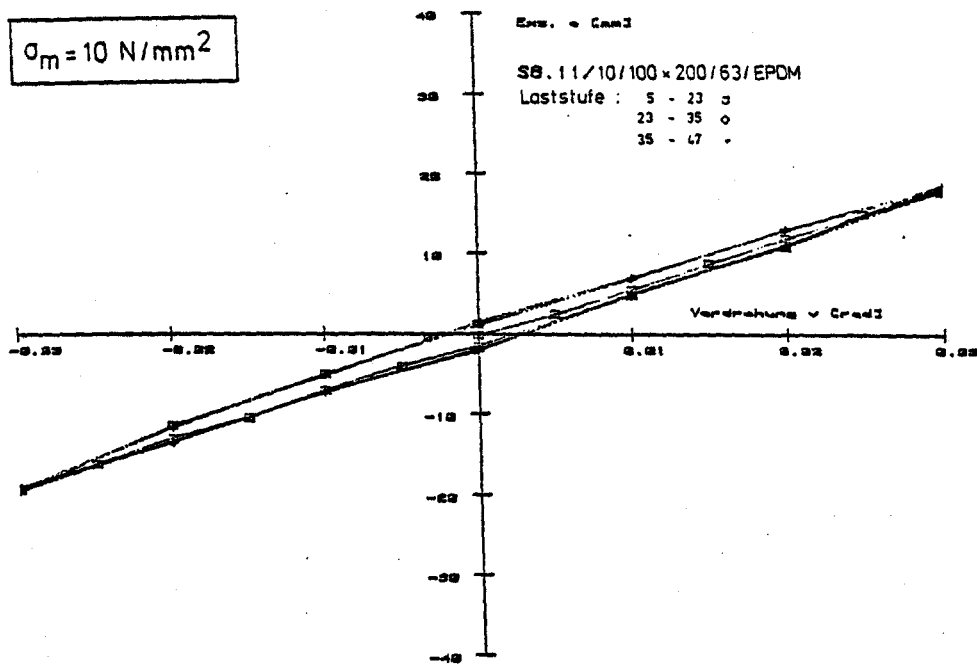


Bild: A 186

$\sigma_m = 20 \text{ N/mm}^2$

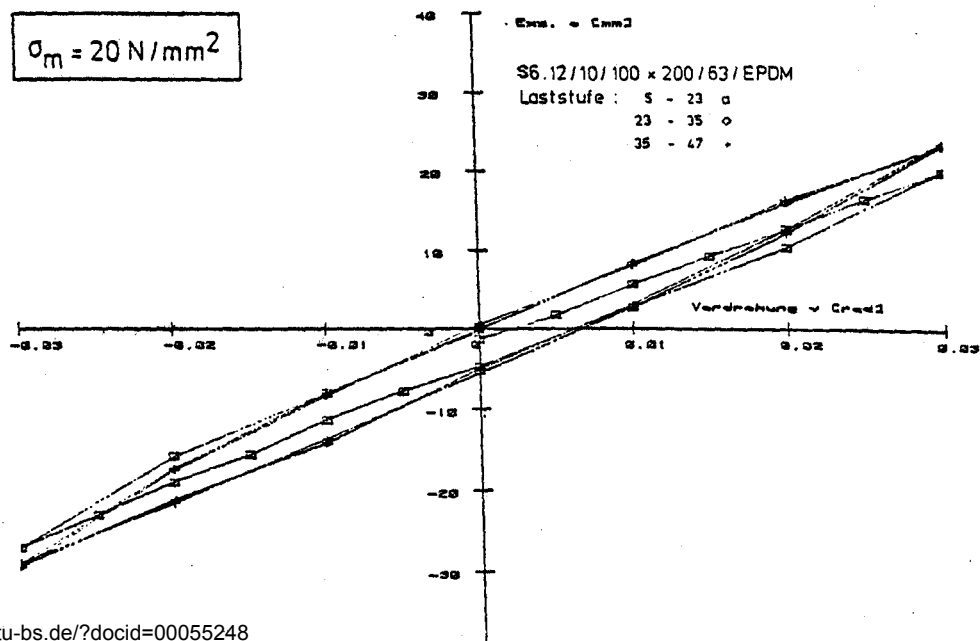


Bild: A 187

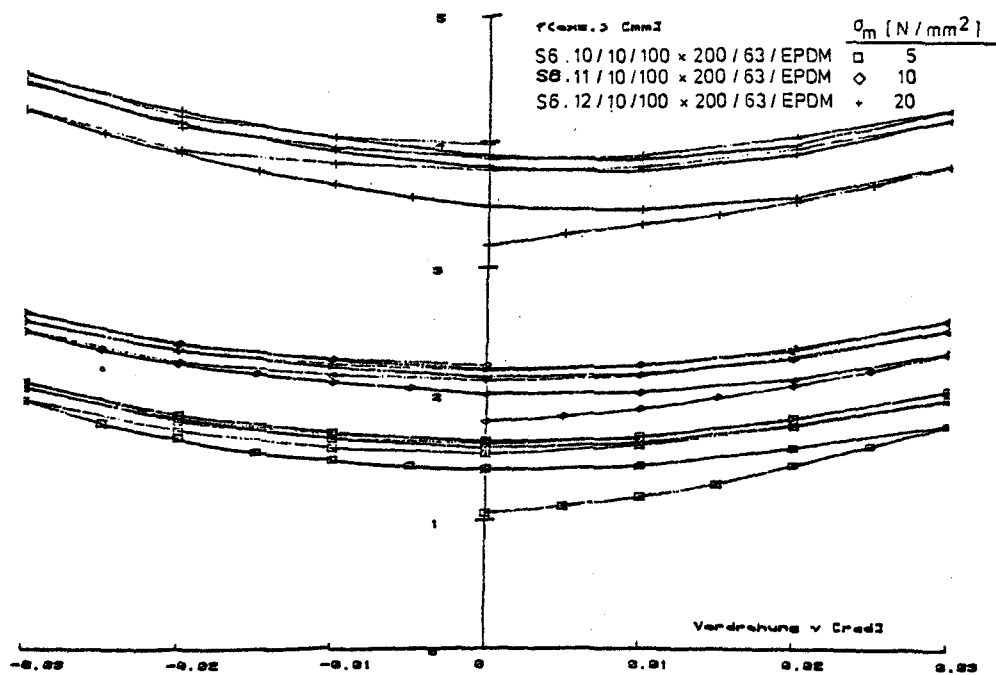


Bild: A 188

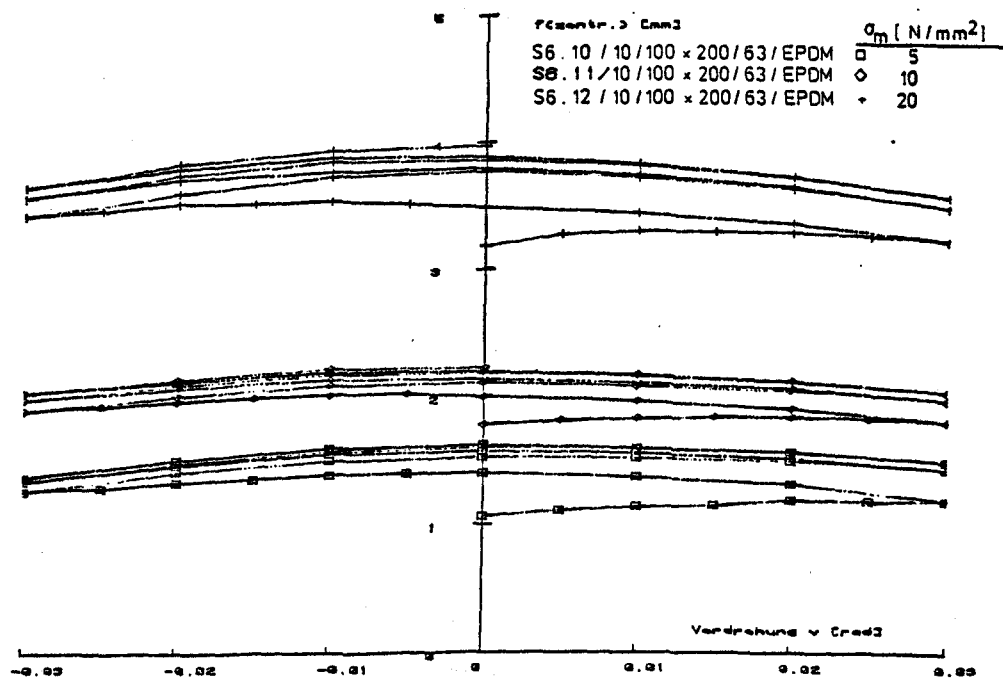


Bild: A 189

zul $\alpha = 0,012 \text{ rad}$

--- e nach Abschn. 11.1.3

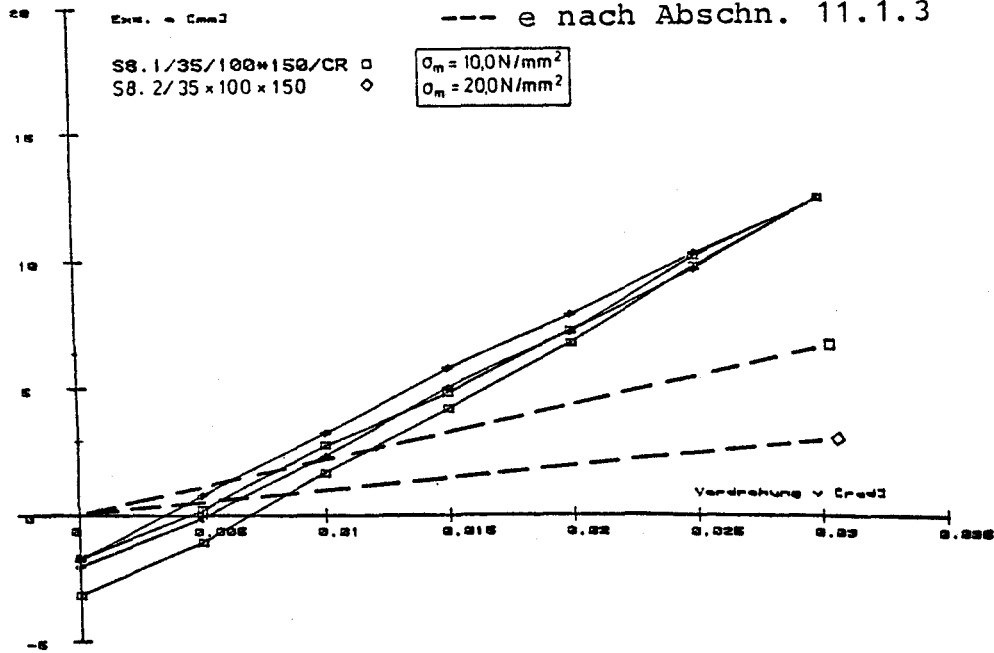


Bild:

A 190

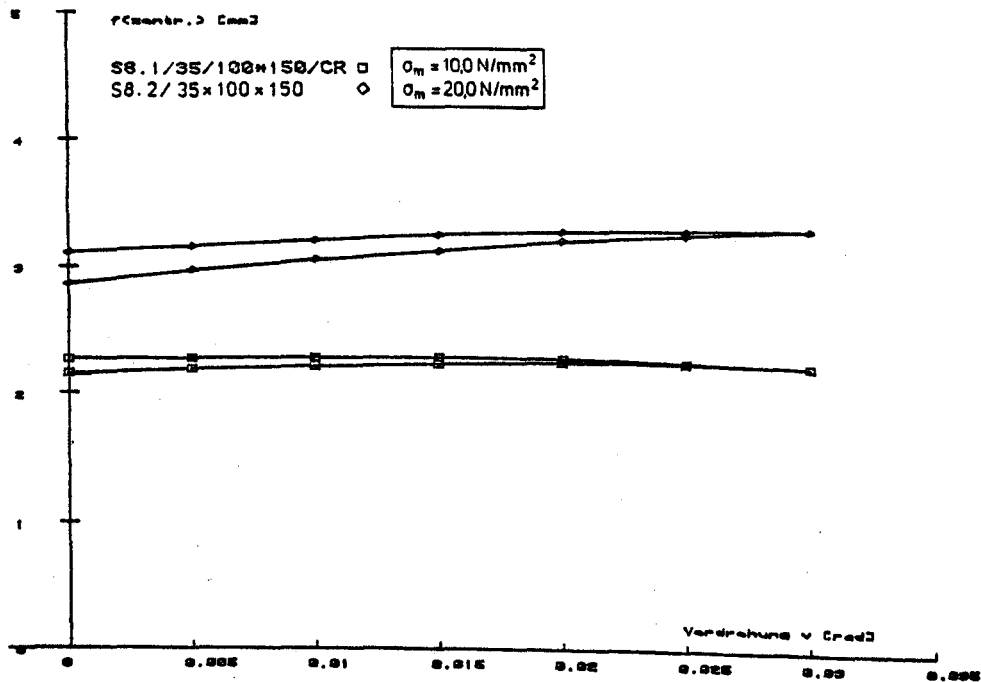


Bild:

A 191

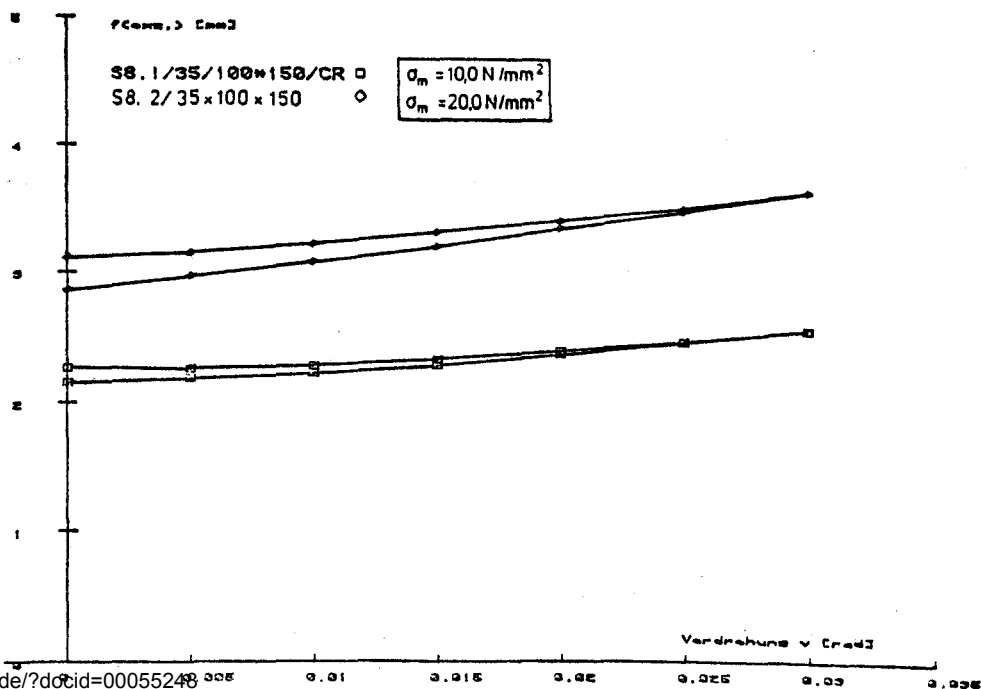


Bild:

A 192

Bild A 193 entfällt!

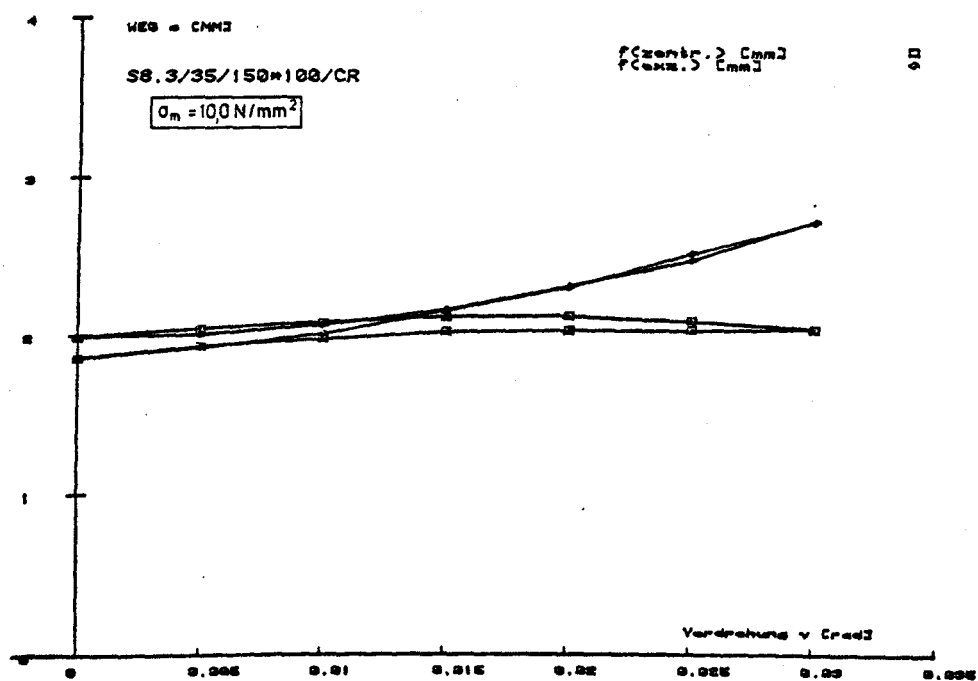


Bild:
A 194

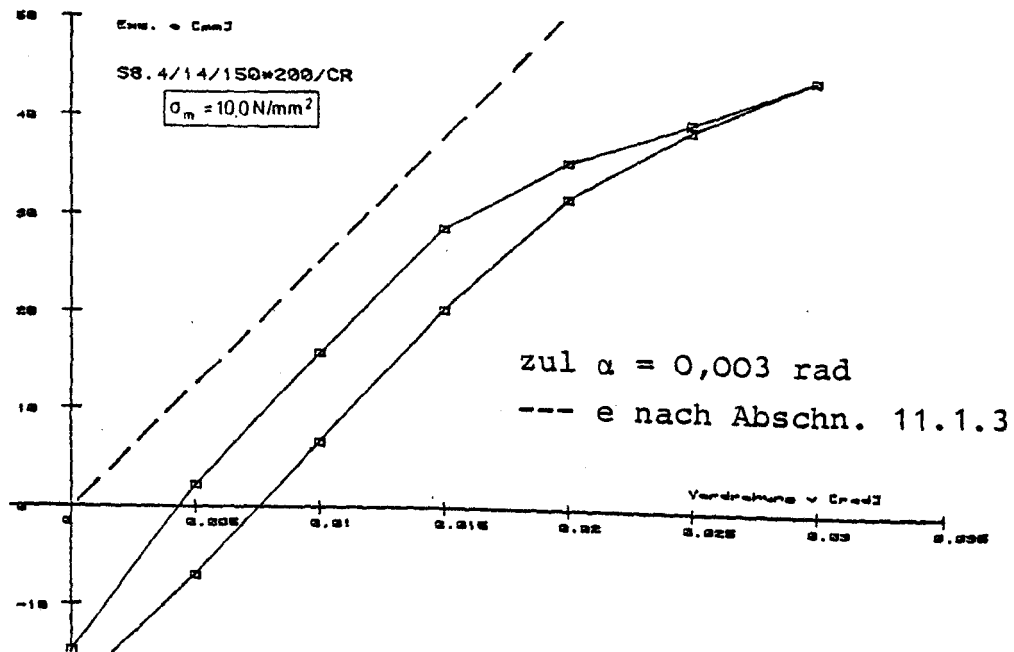


Bild:
 A 195

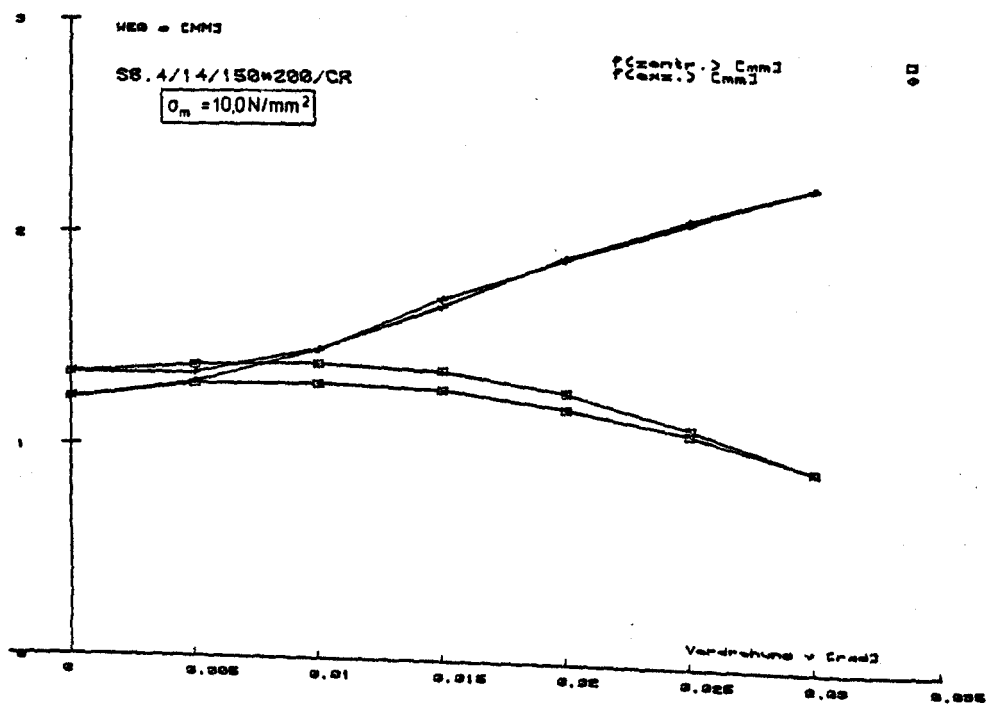


Bild:
 A 196

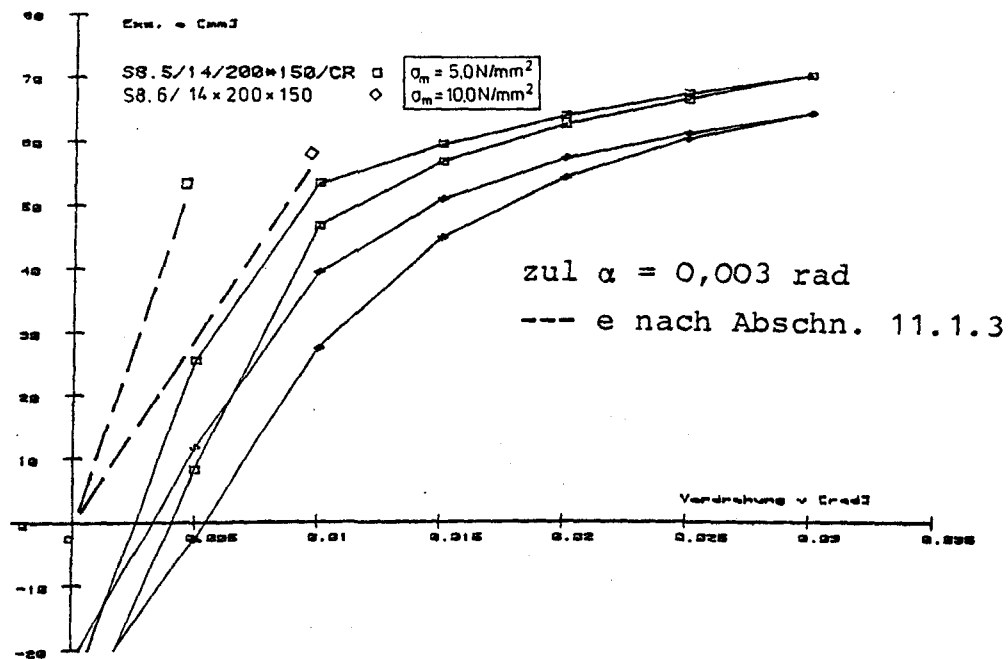


Bild:

A 197

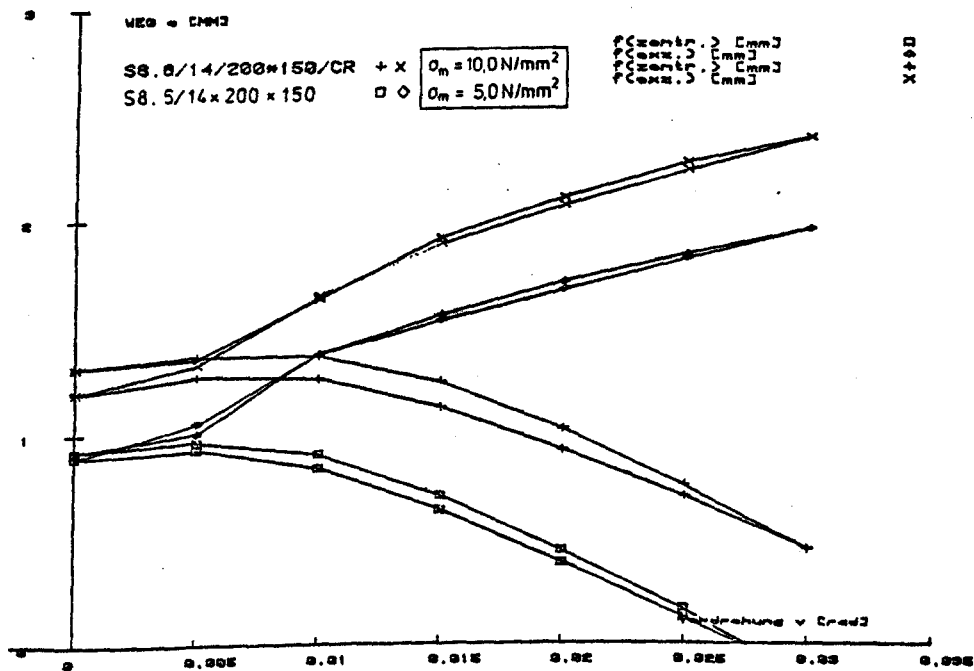


Bild:

A 198

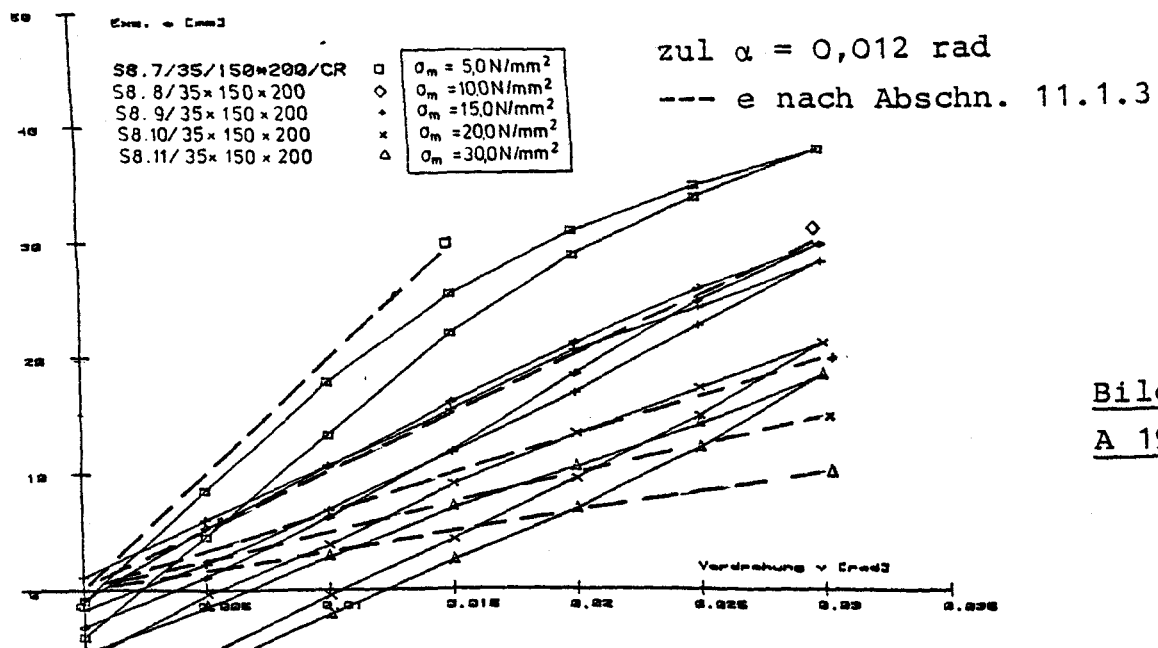


Bild:
A 199

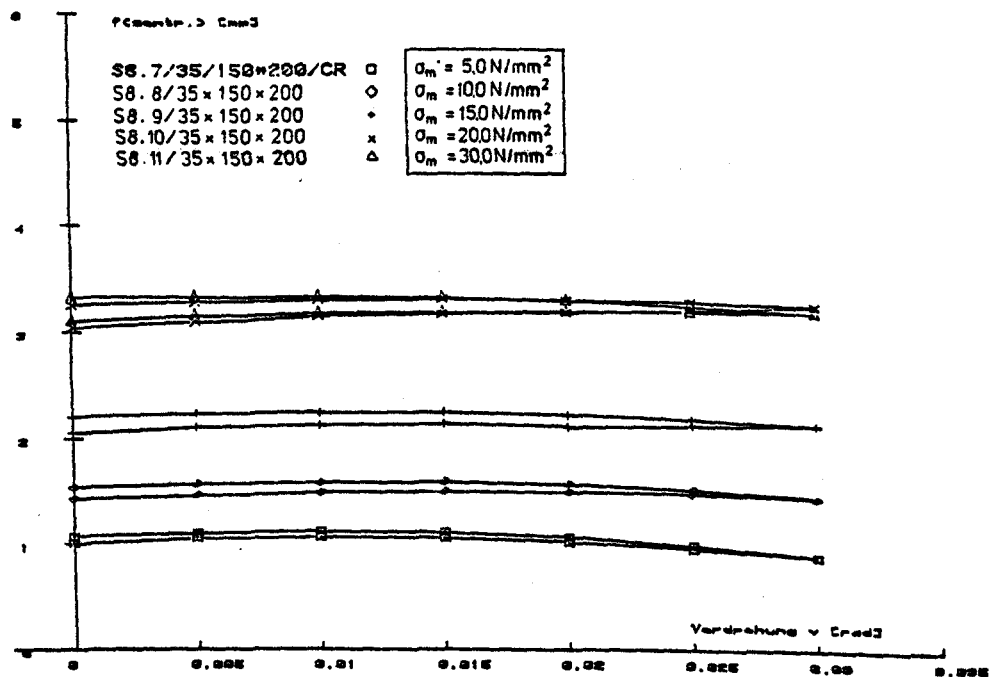


Bild:
A 200

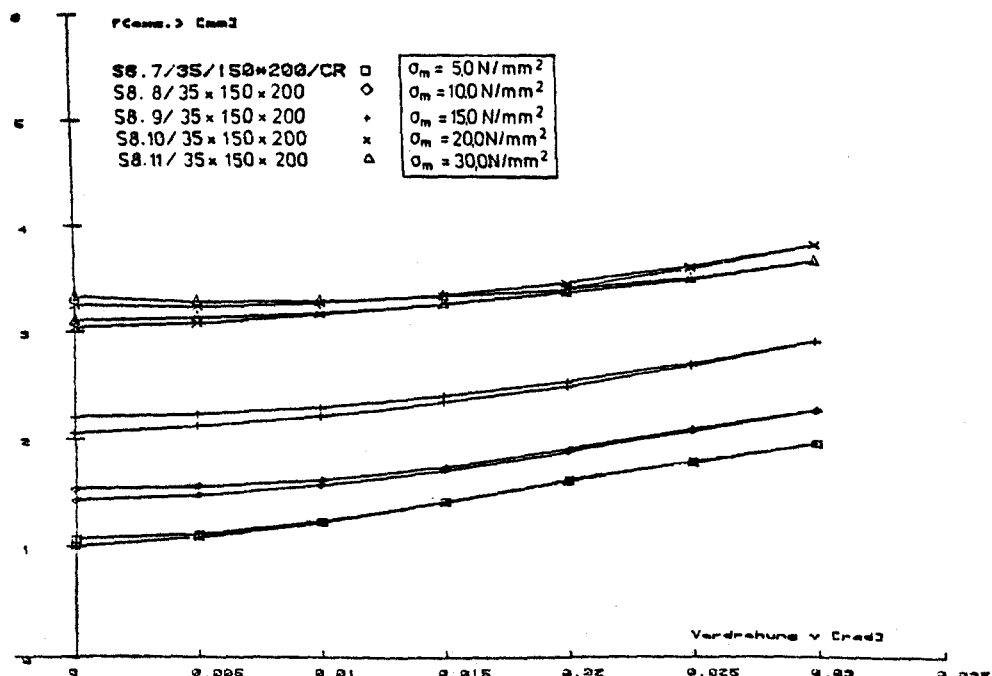


Bild:
A 201

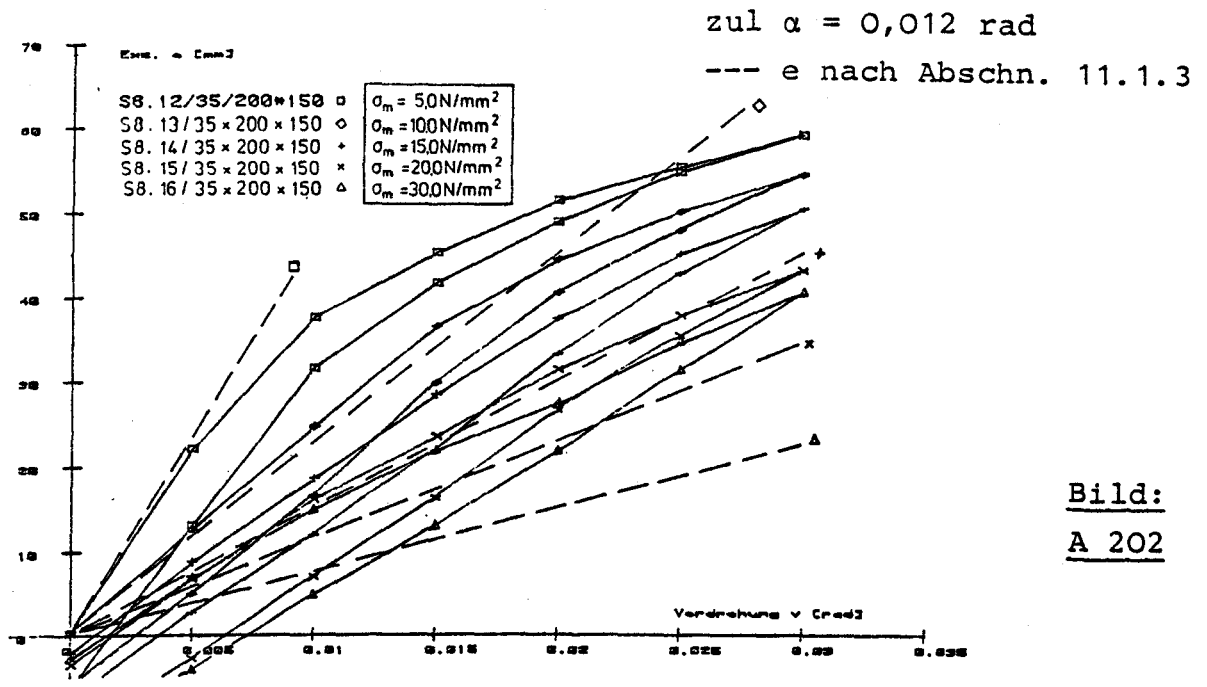


Bild:
 A 202

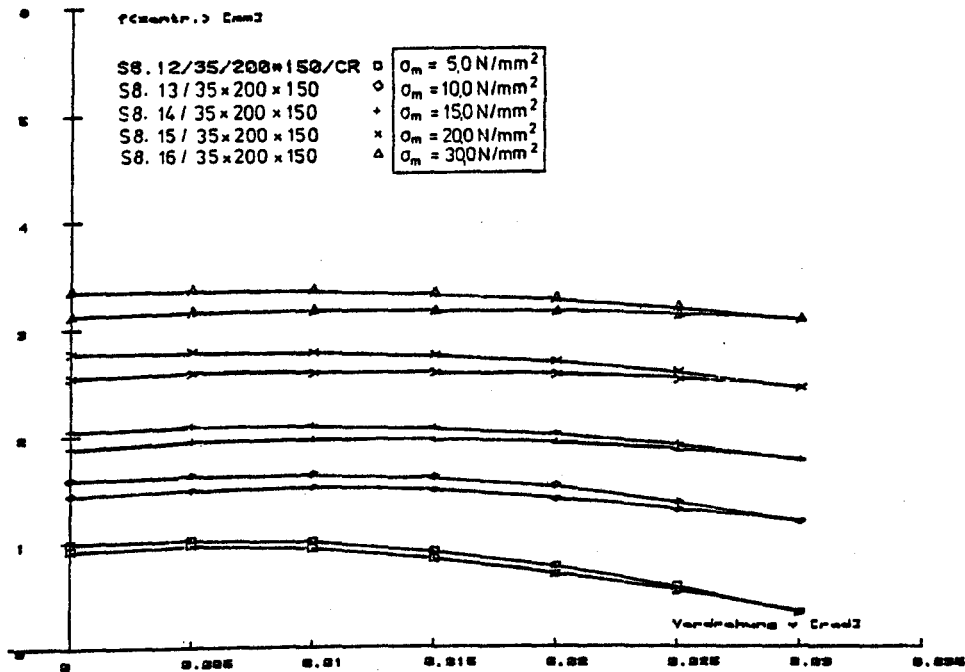


Bild:
 A 203

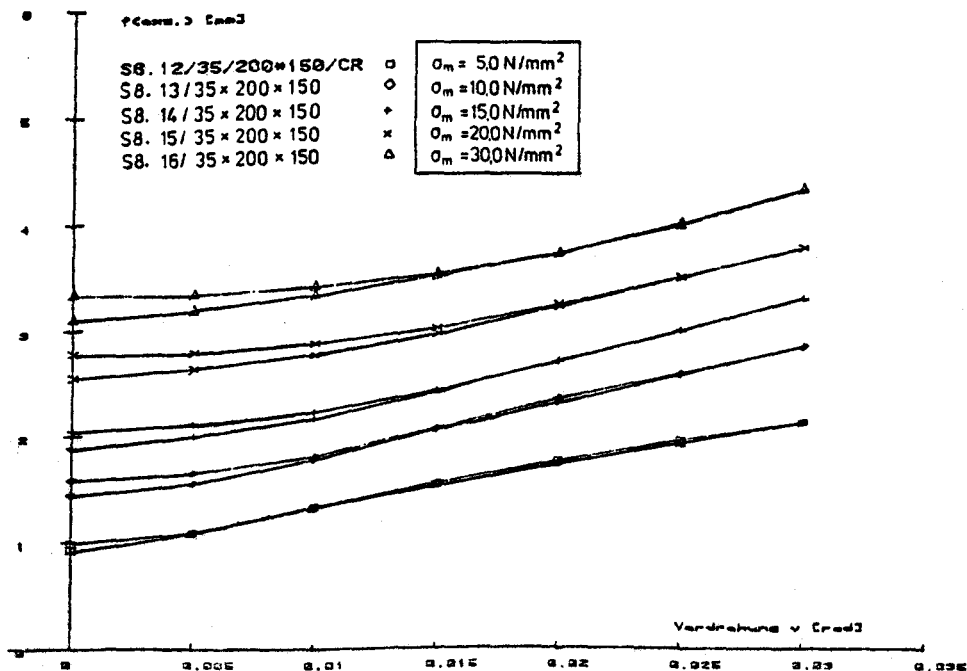


Bild:
 A 204

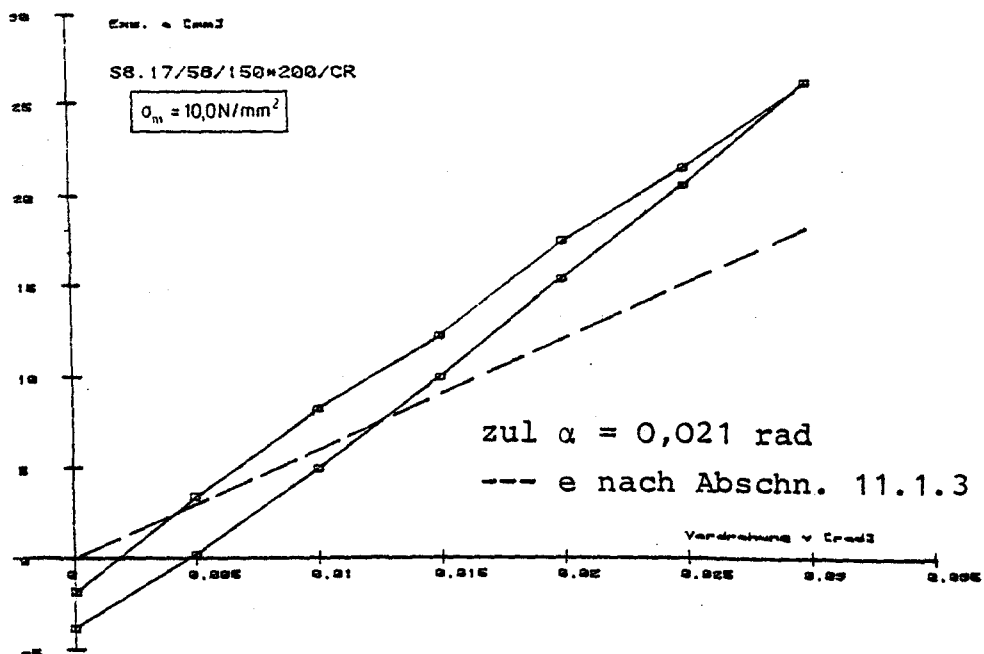


Bild:
A 205

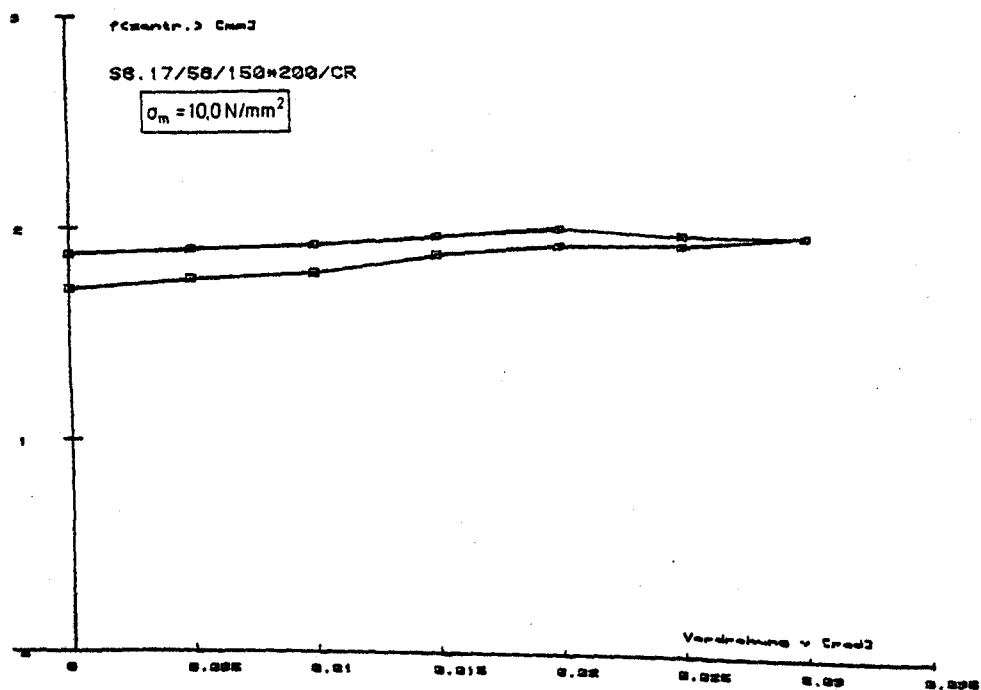


Bild:
A 206

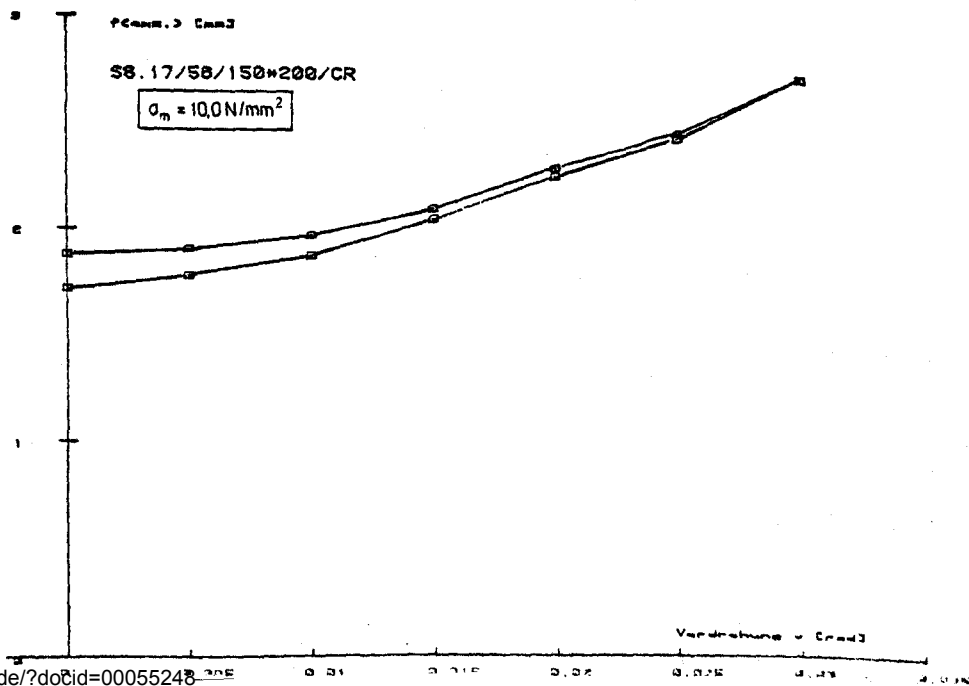


Bild:
A 207

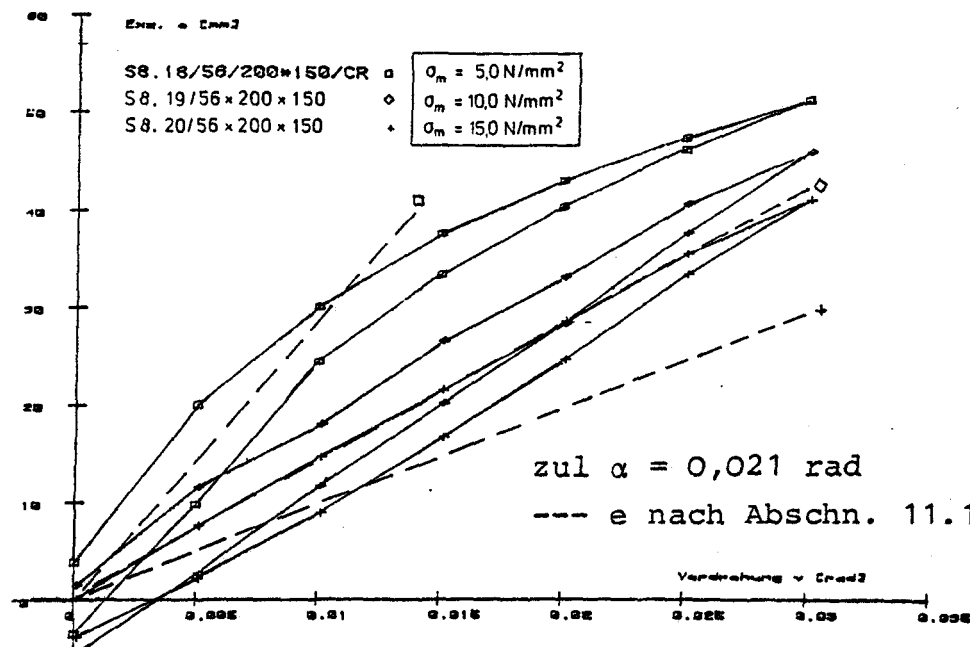


Bild:
 A 208

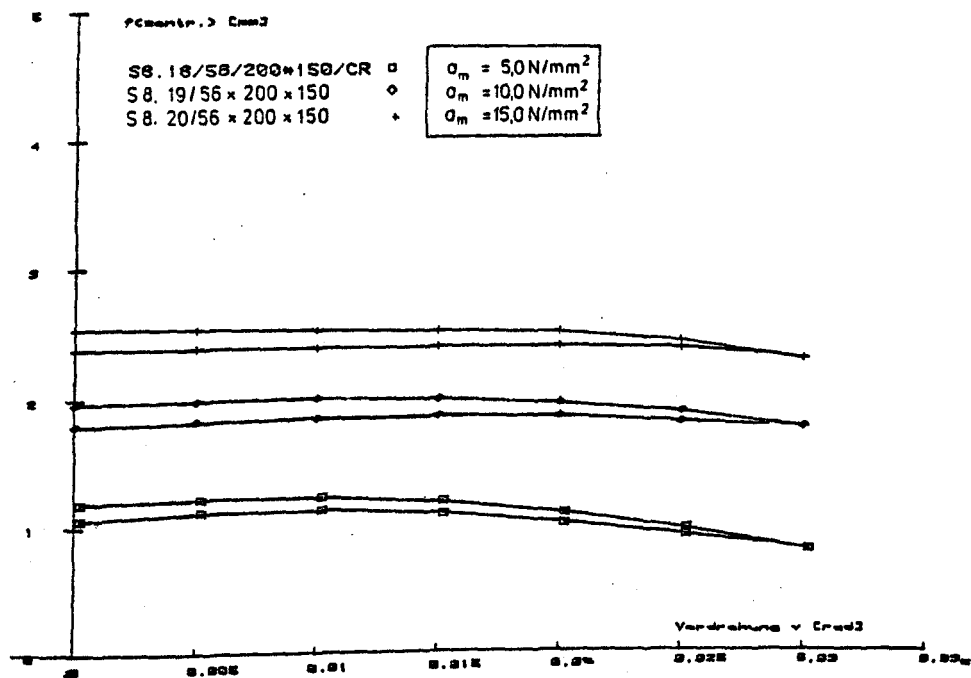


Bild:
 A 209

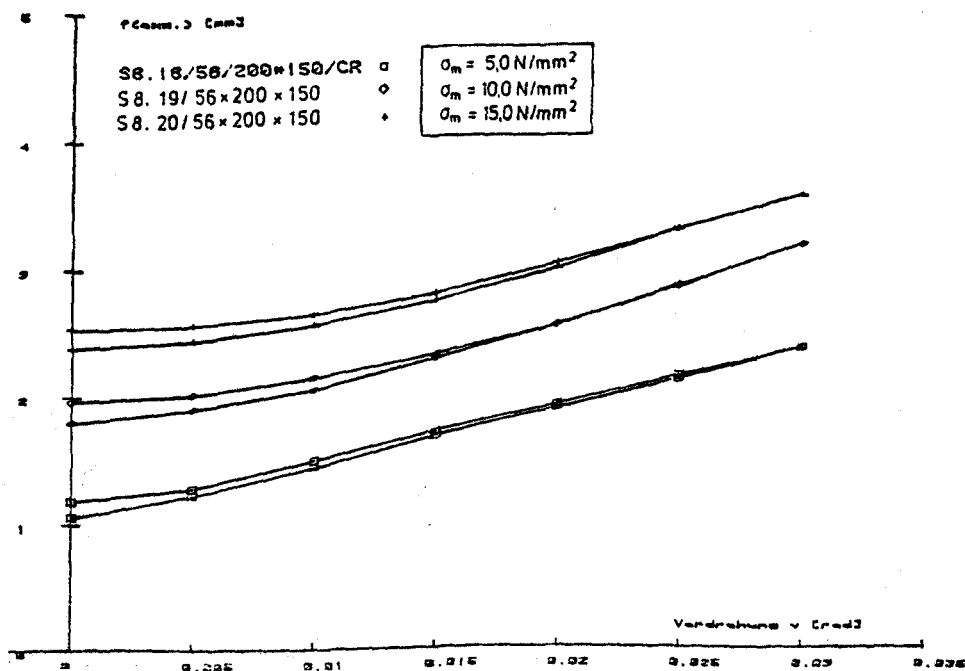


Bild:
 A 210

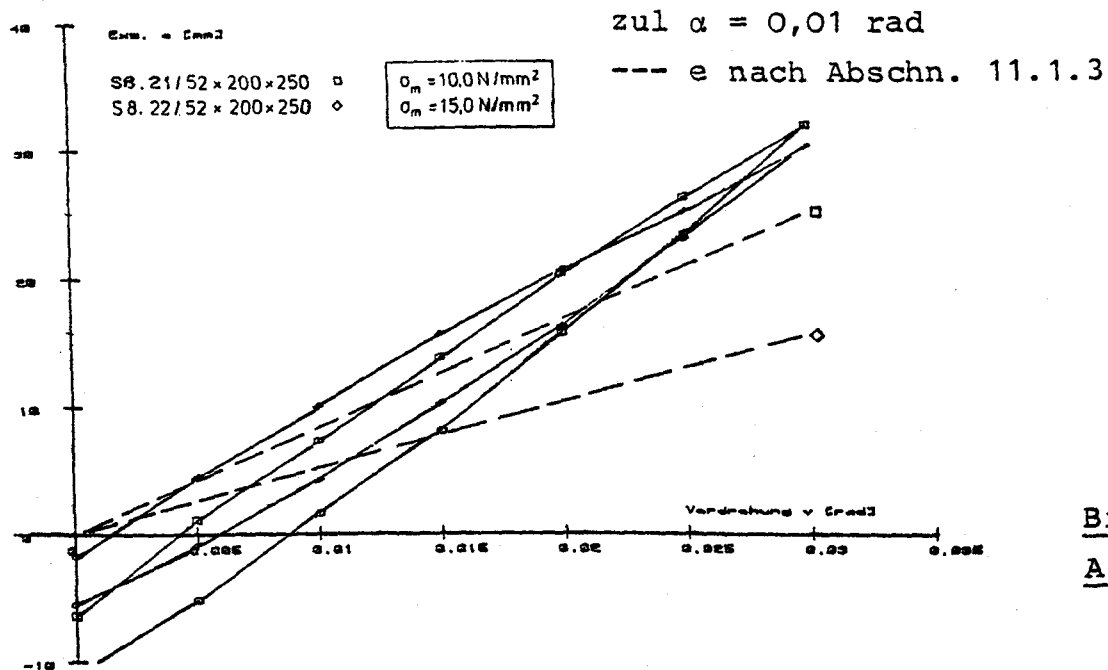


Bild:
A 211

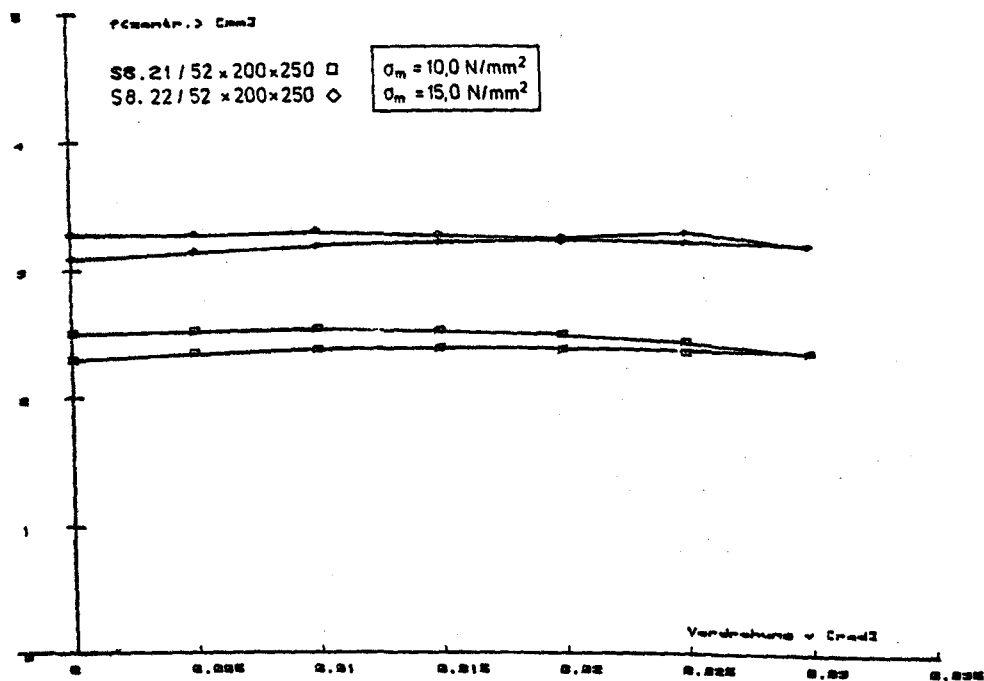


Bild:
A 212

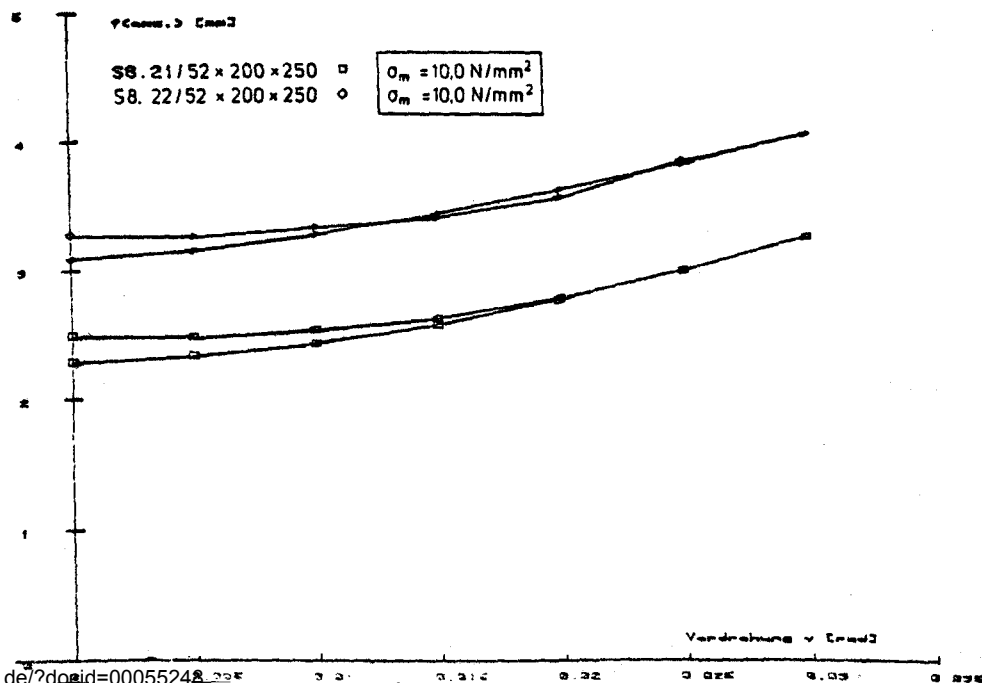


Bild:
A 213

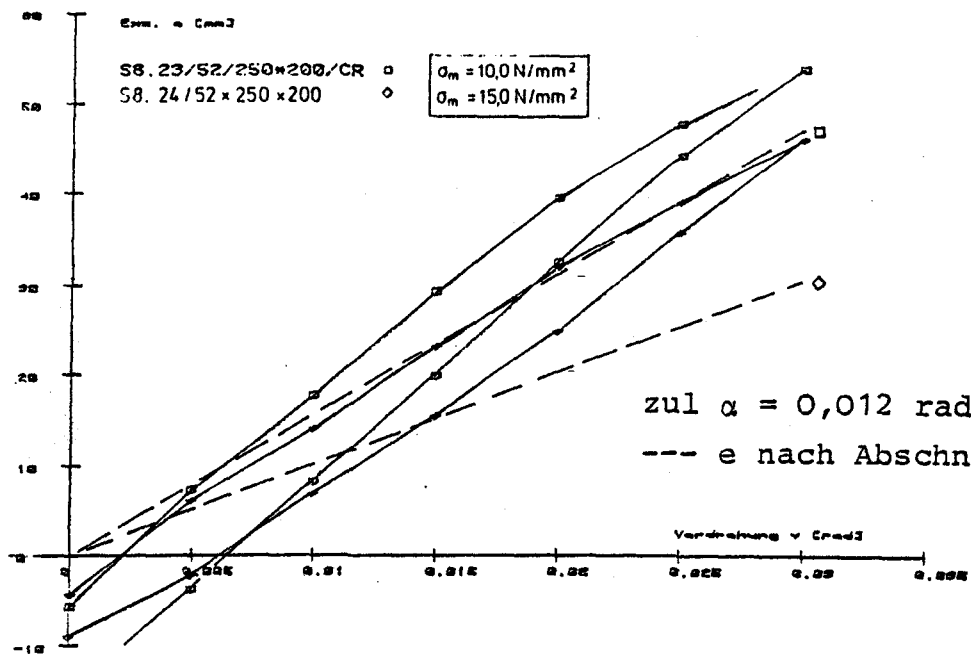


Bild:

A 214

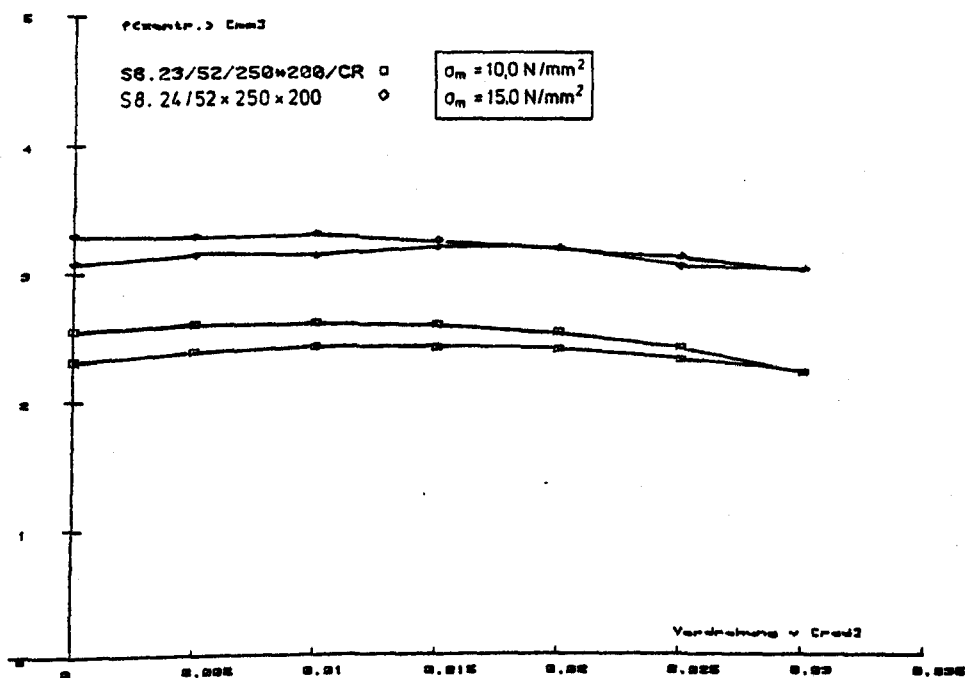


Bild:

A 215

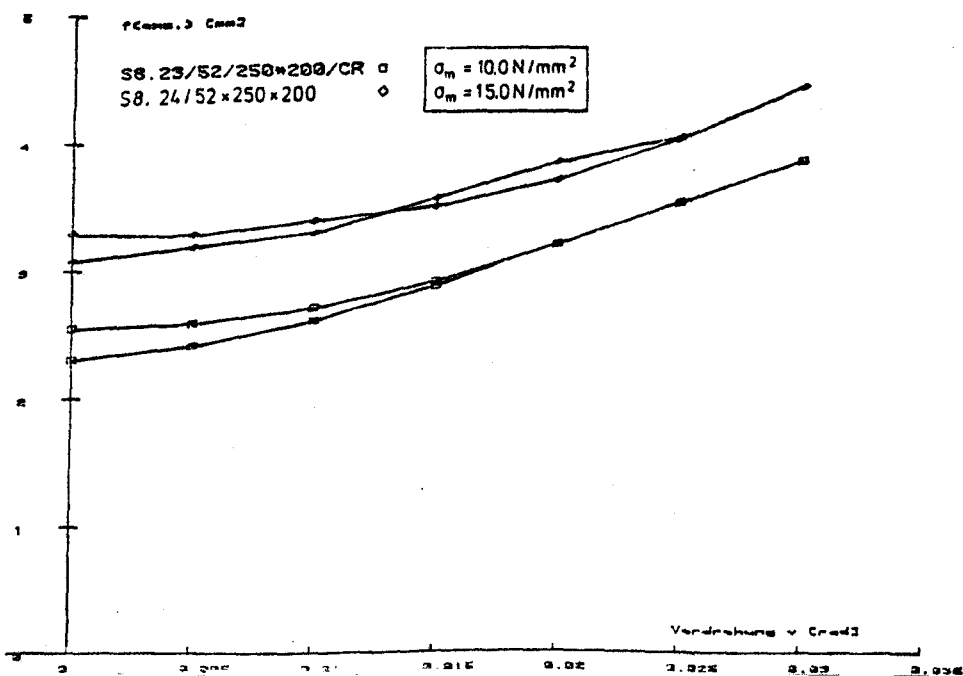


Bild:

A 216

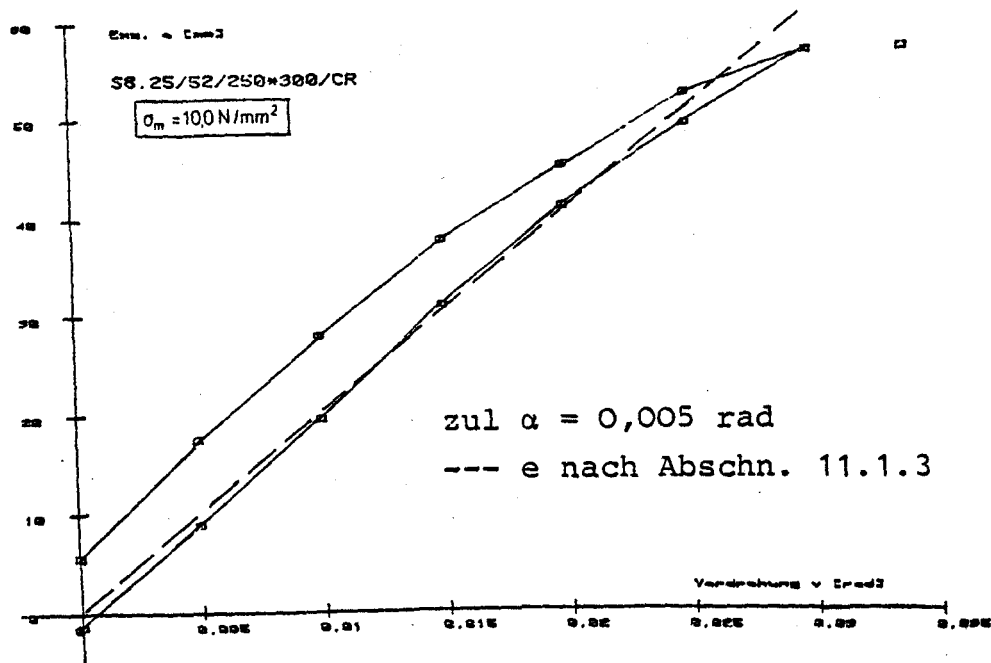


Bild:
 A 217

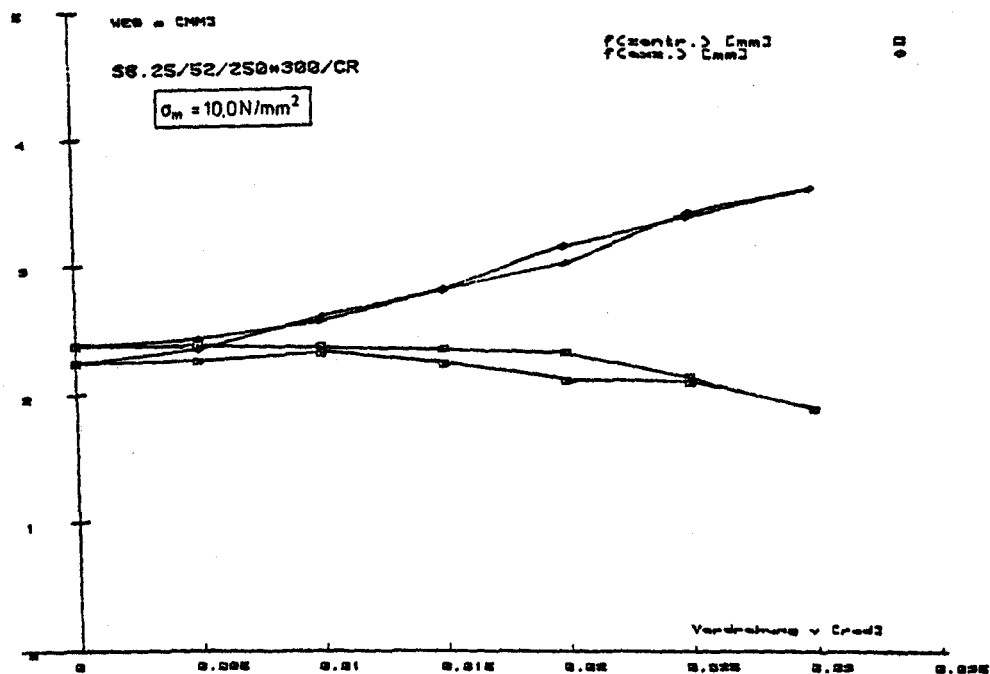


Bild:
 A 218

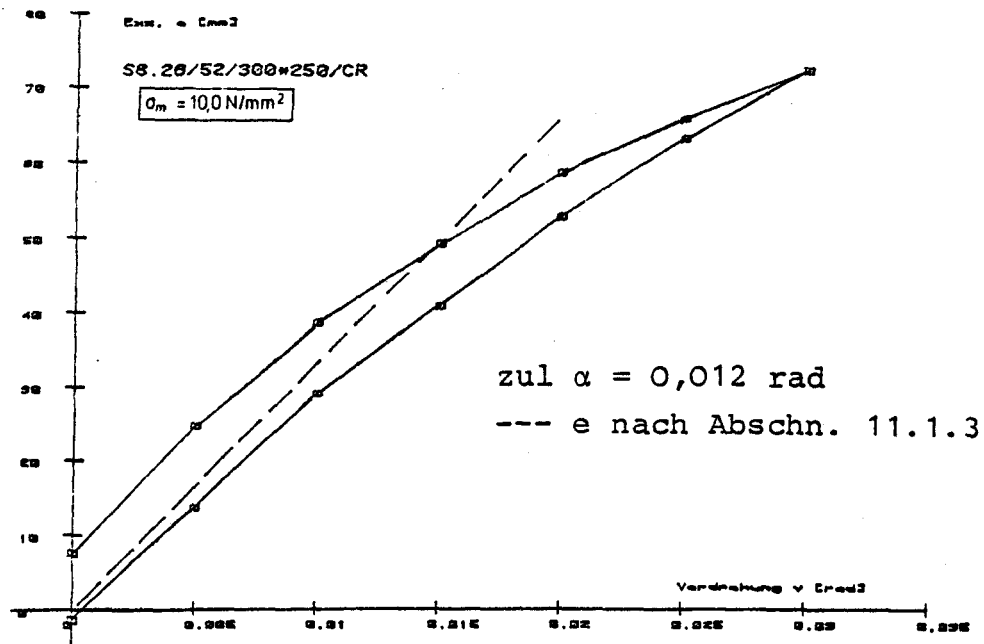


Bild:

A 219

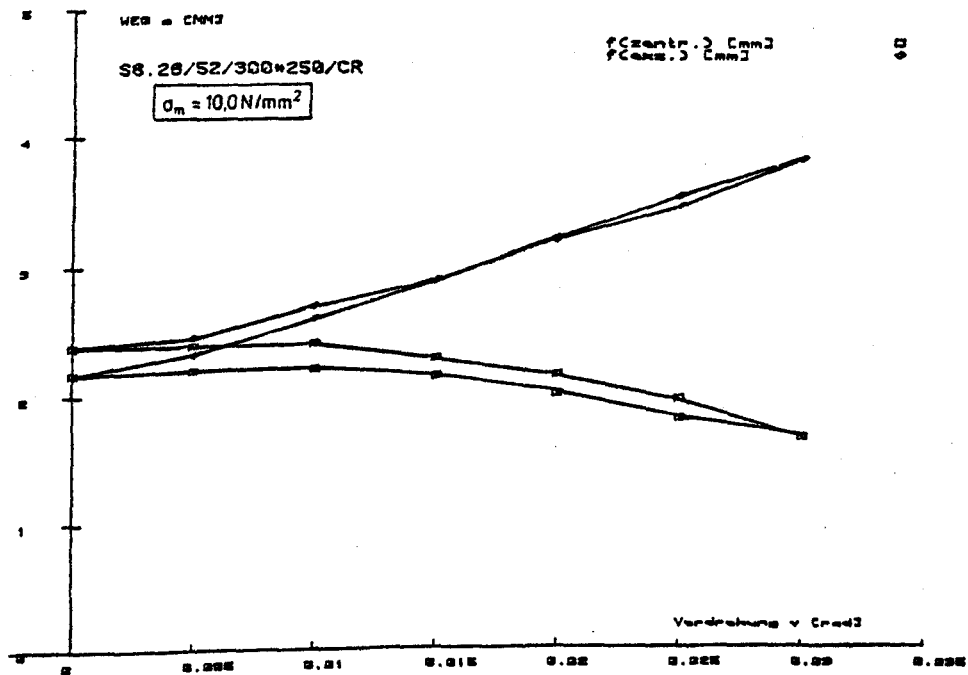


Bild:

A 220

zul $\alpha = 0,016 \text{ rad}$

--- e nach Abschn. 11.1.3

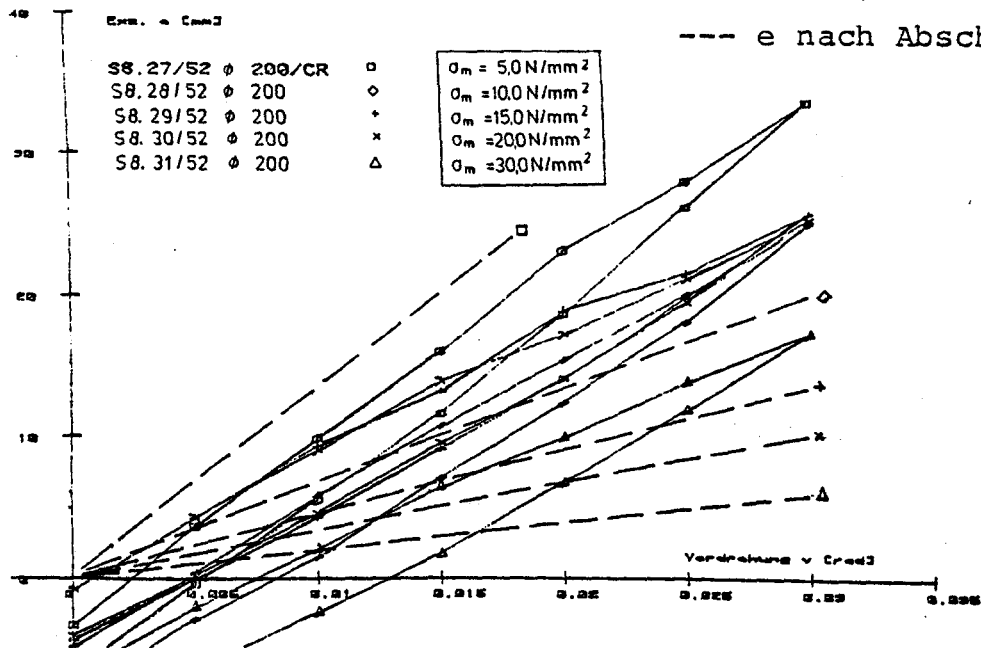


Bild:

A 221

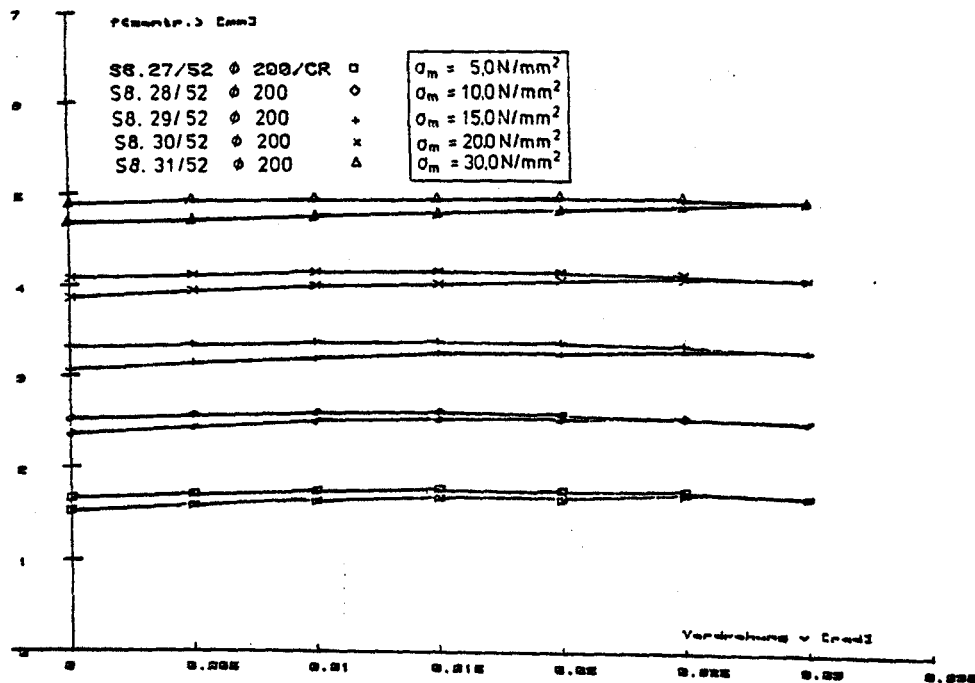


Bild:

A 222

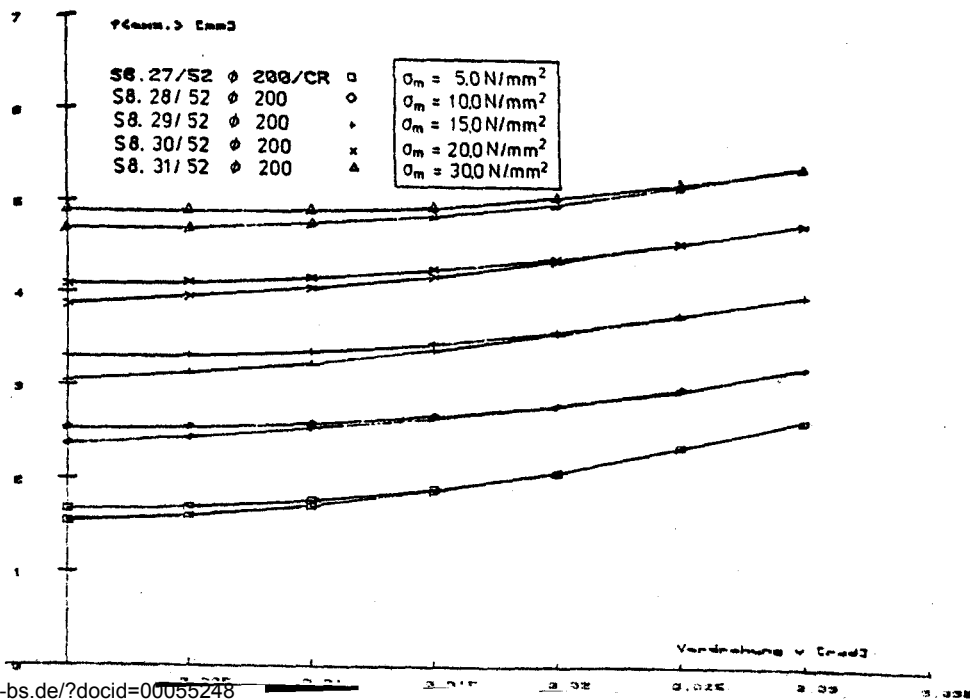


Bild:

A 223

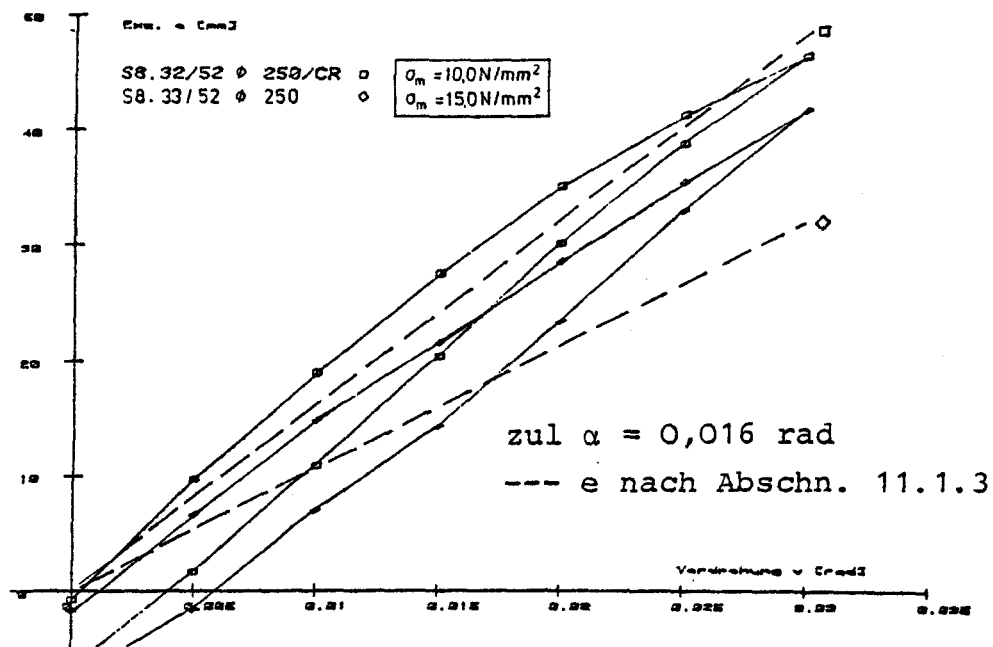


Bild:
A 224

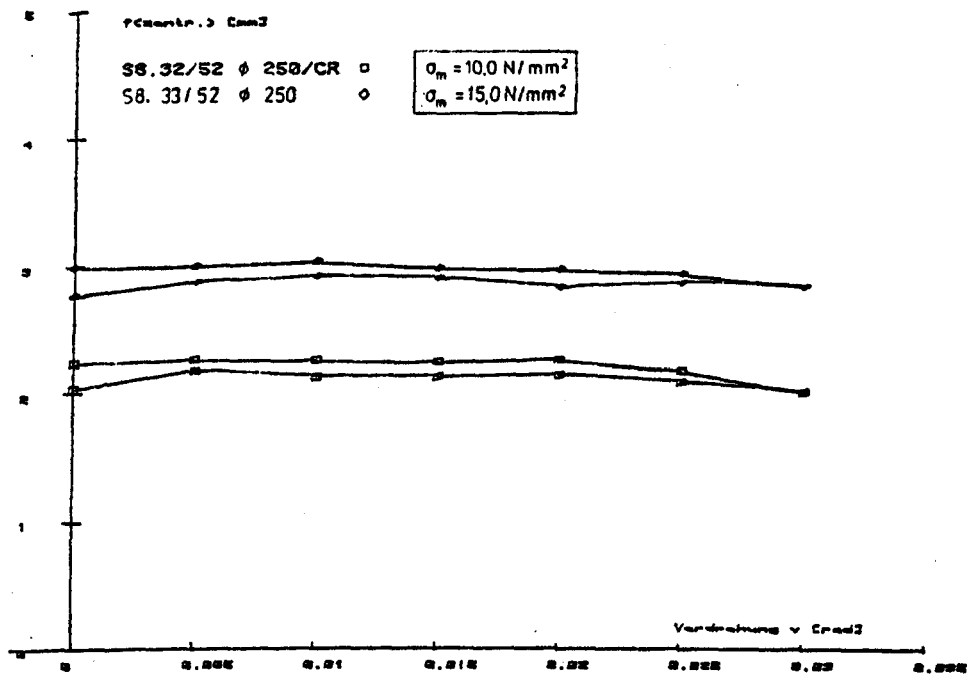


Bild:
A 225

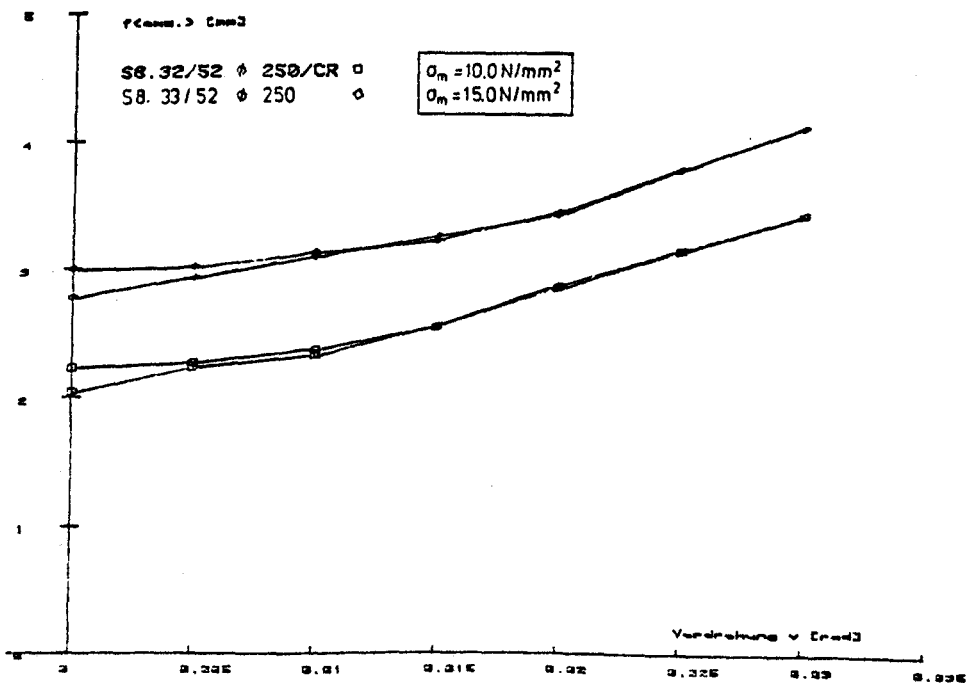


Bild:
A 226

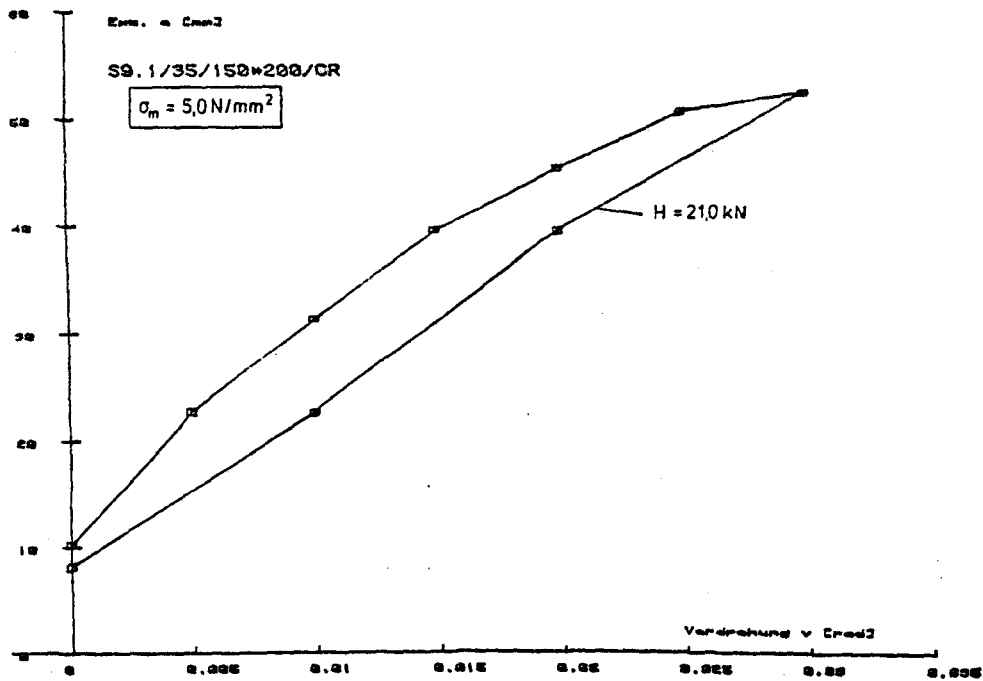


Bild:
A 227

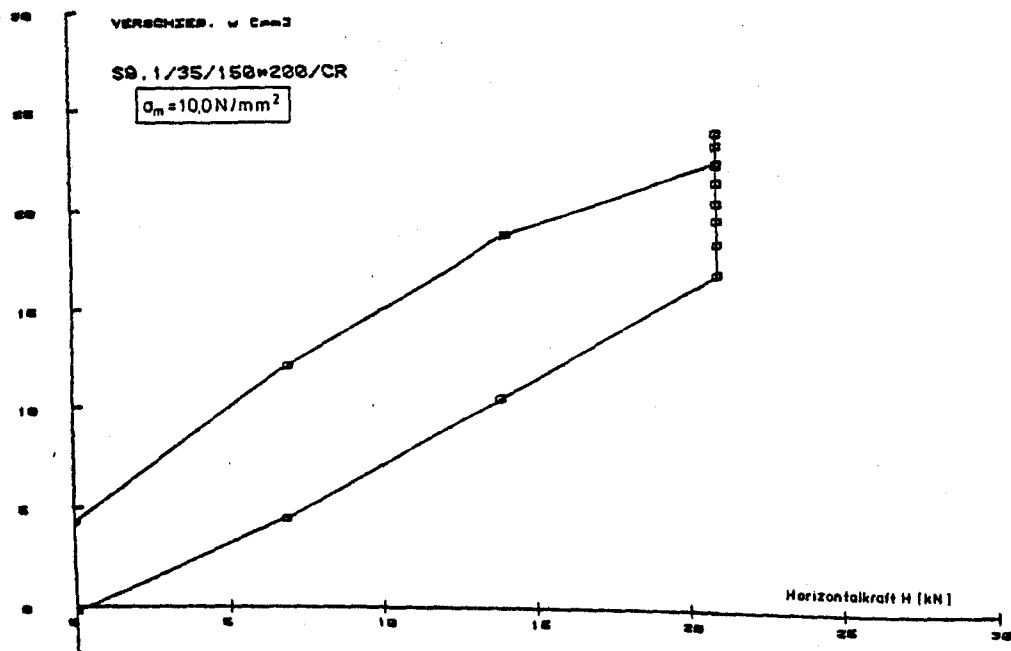


Bild:
A 228

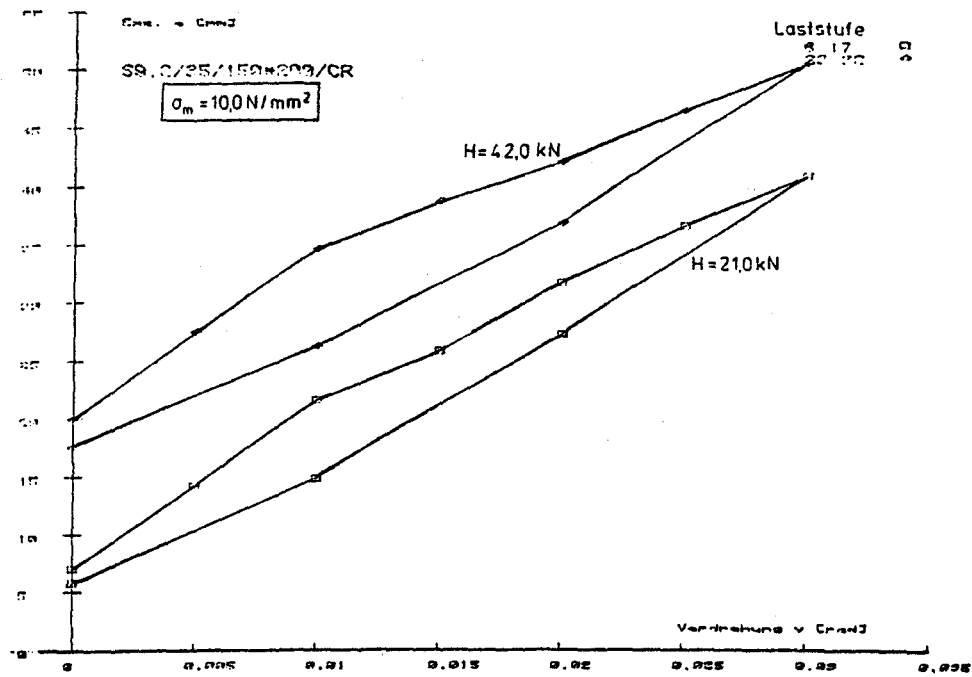


Bild:

A 229

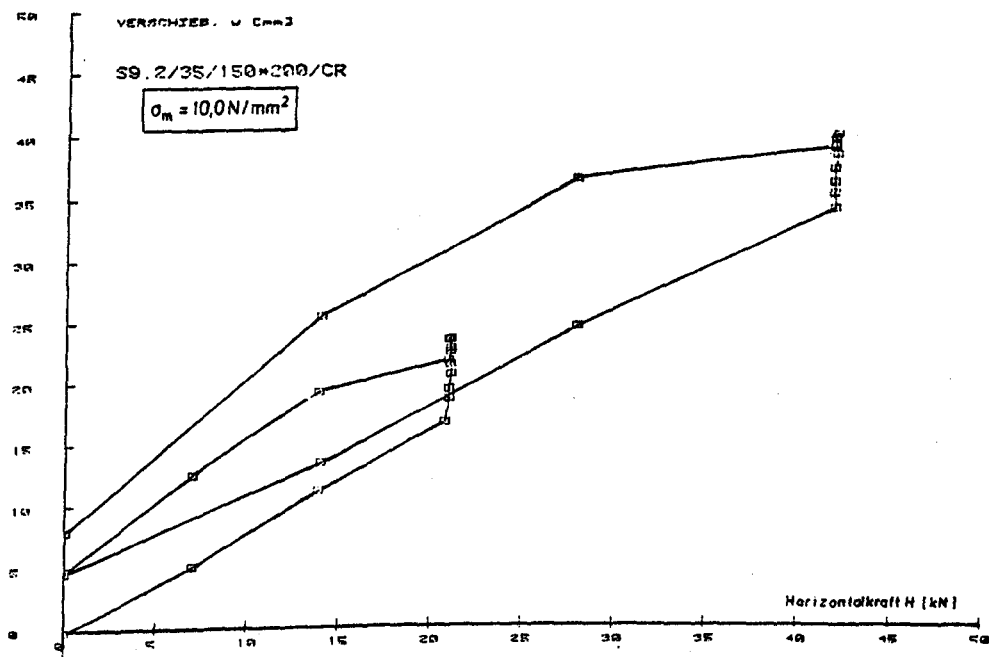


Bild:

A 230

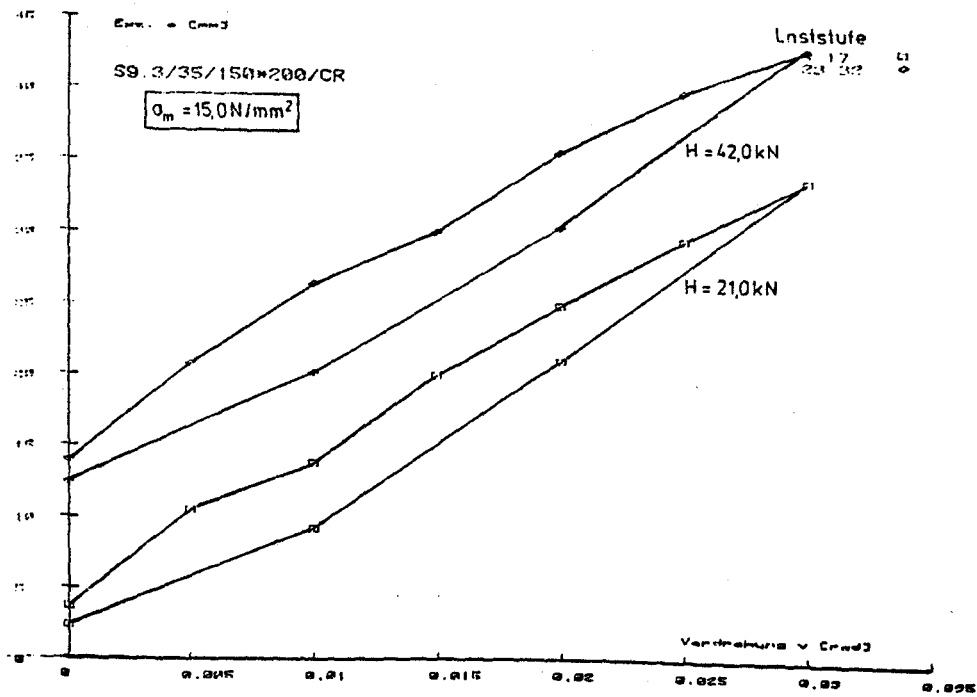


Bild:
A 231

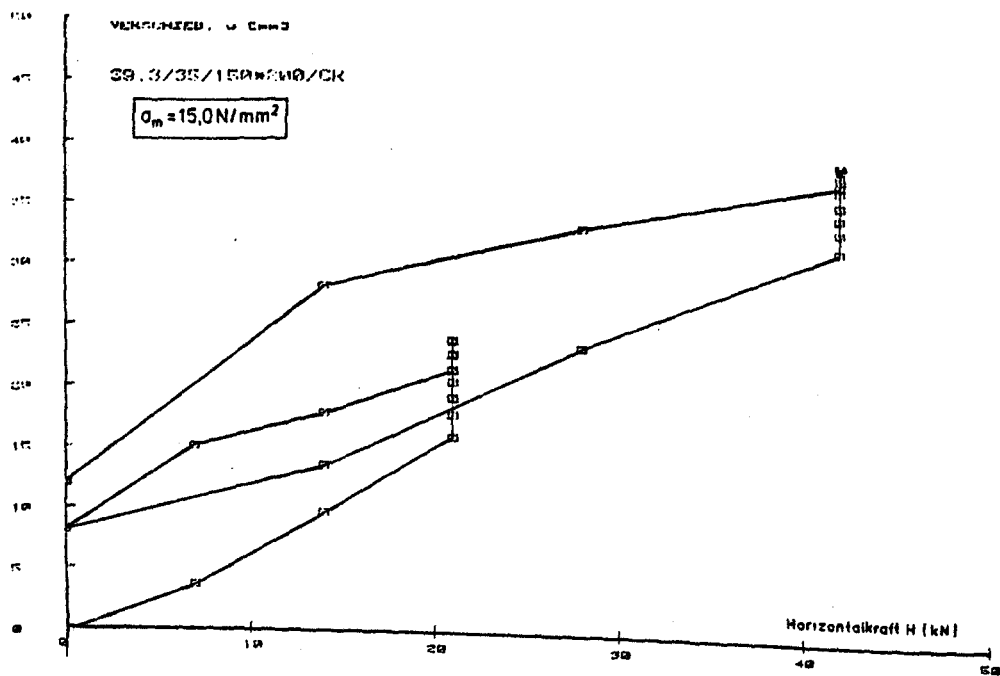


Bild:
A 232

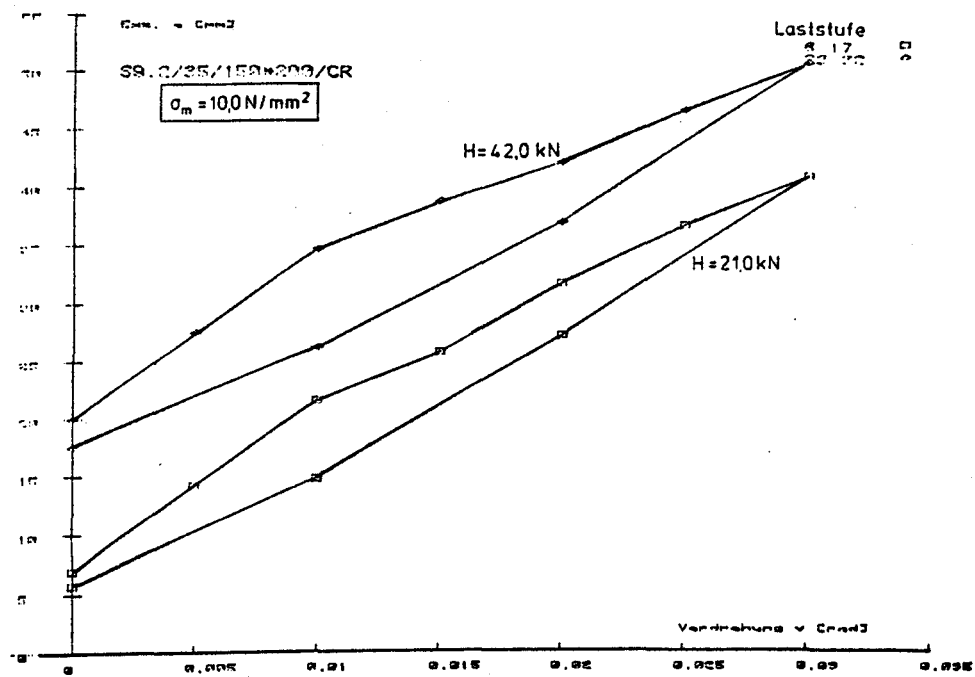


Bild:

A 229

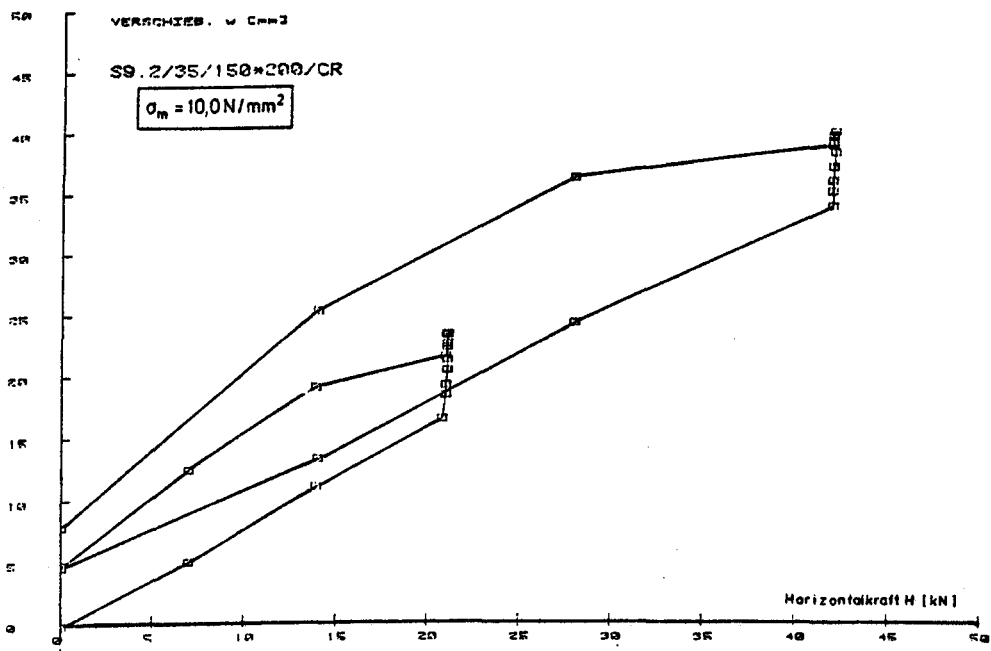


Bild:

A 230

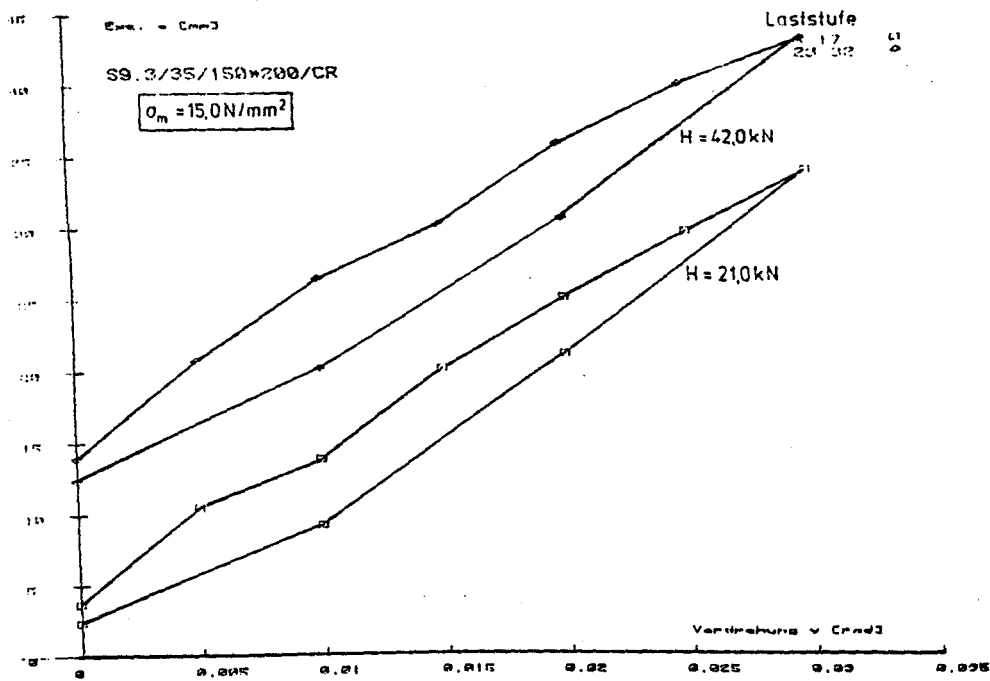


Bild:
A 231

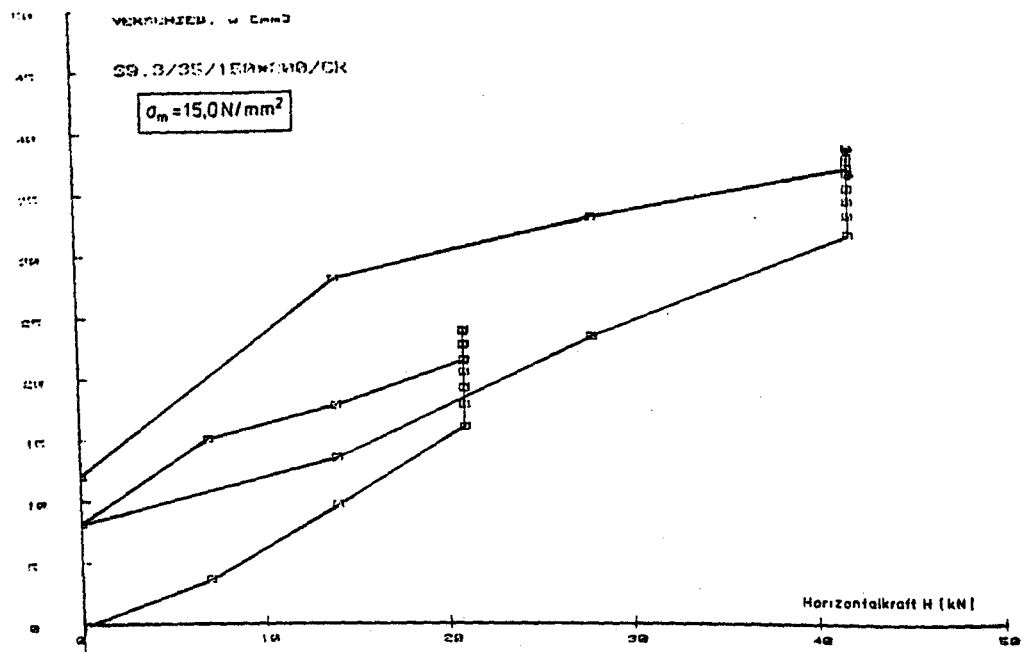


Bild:
A 232

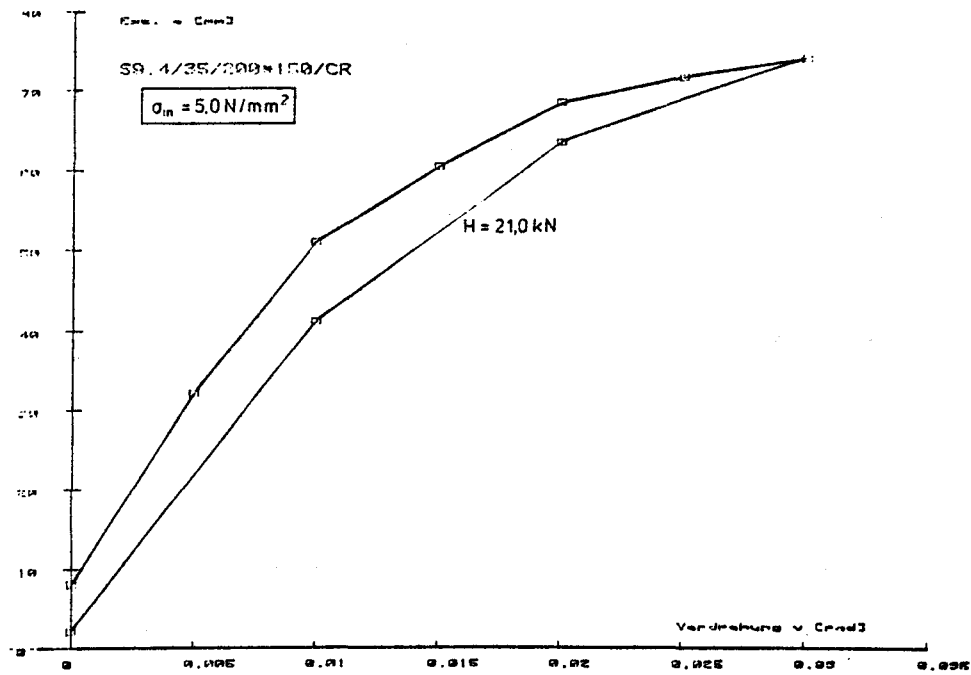


Bild:
A 233

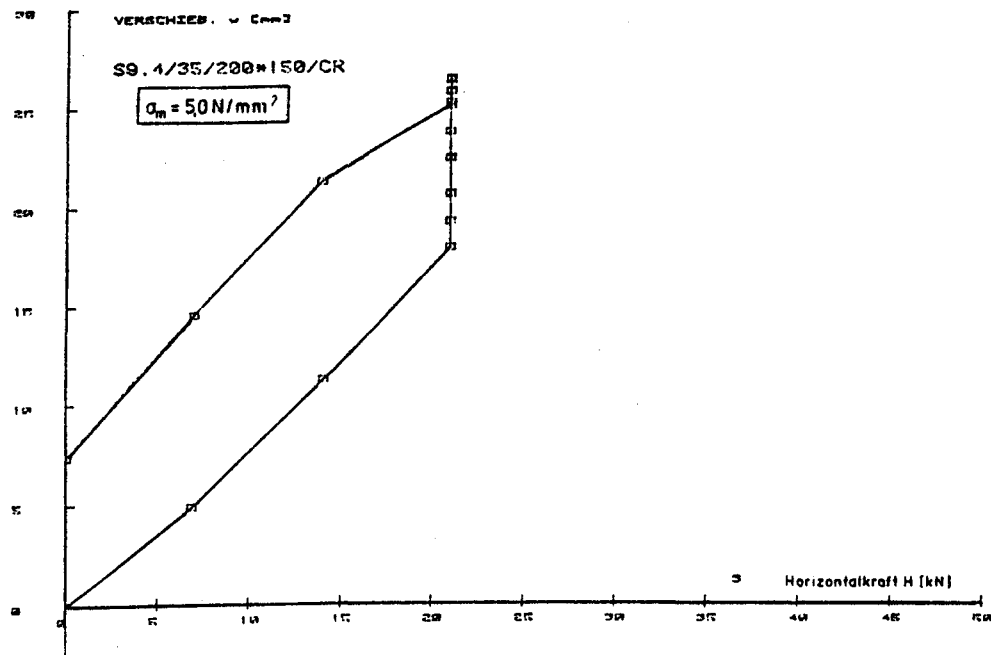


Bild:
A 234

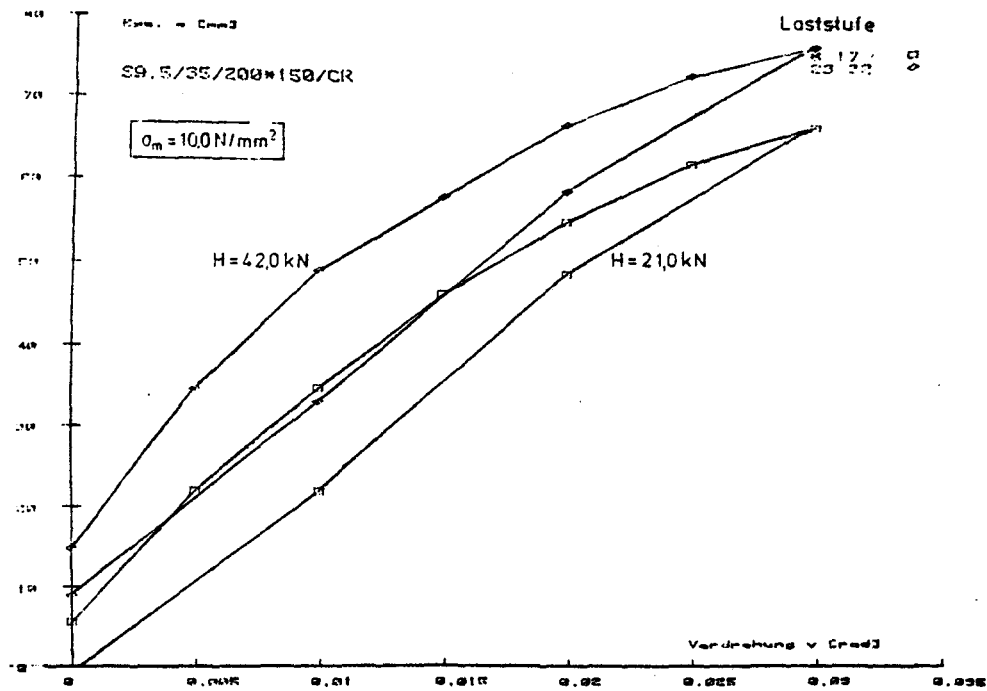


Bild:
A 235

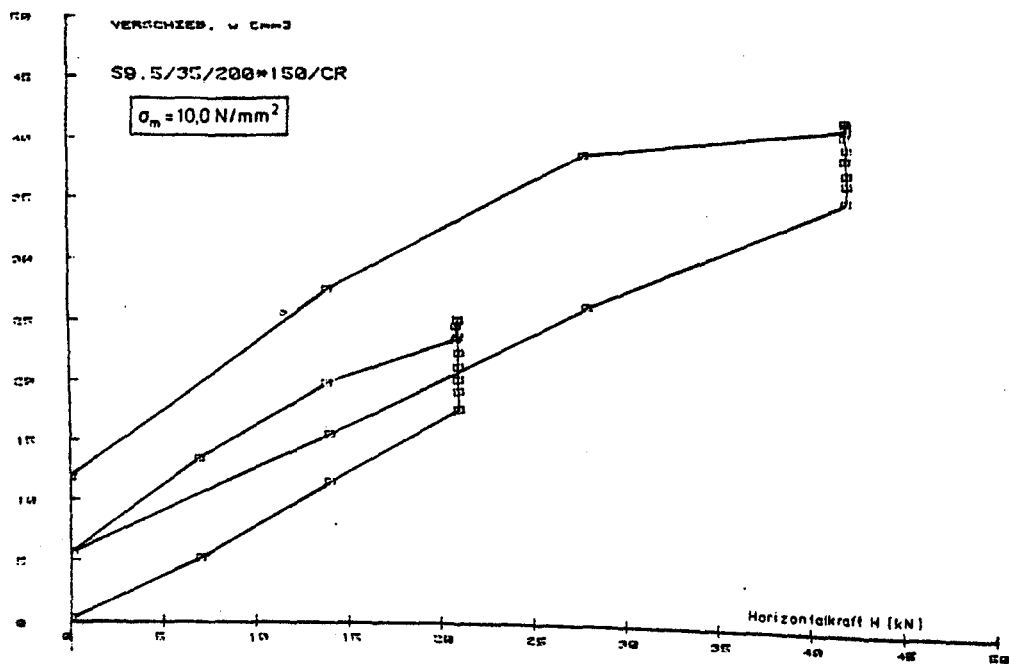


Bild:
A 236

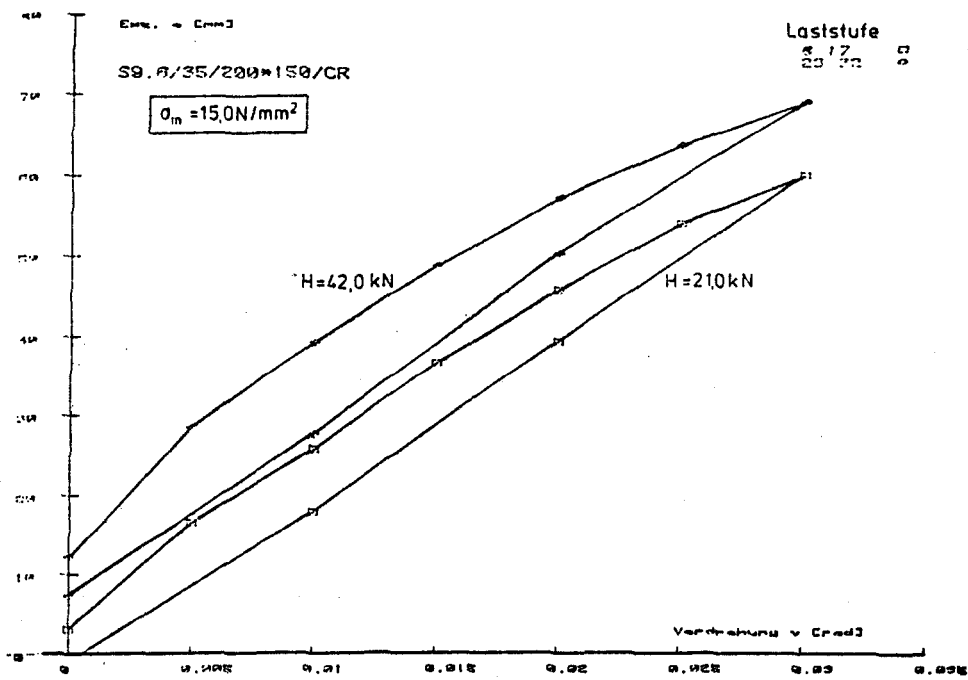


Bild:
 A 237

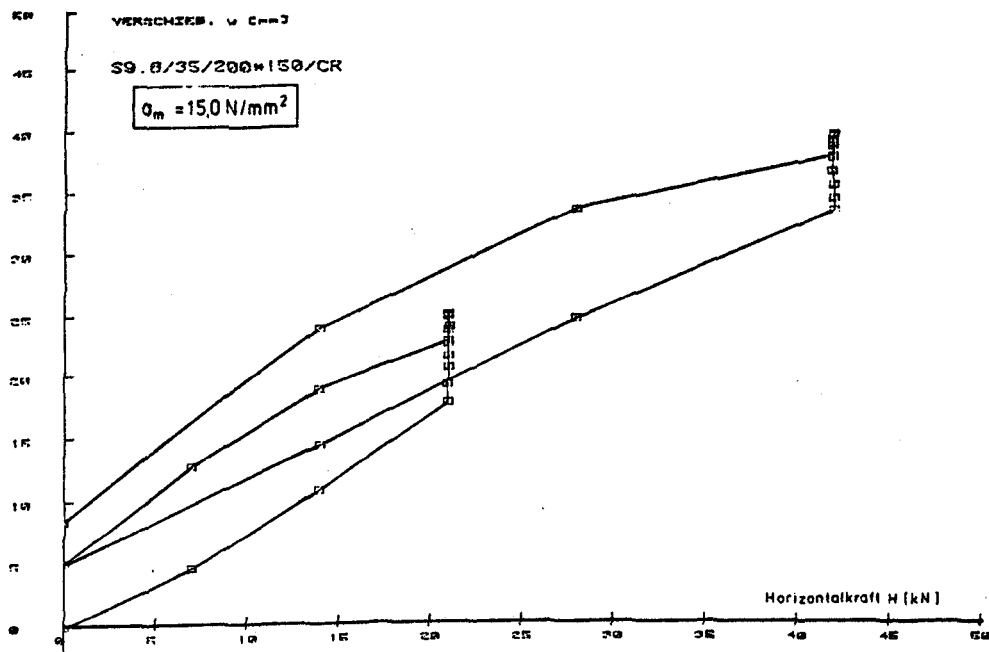


Bild:
 A 238

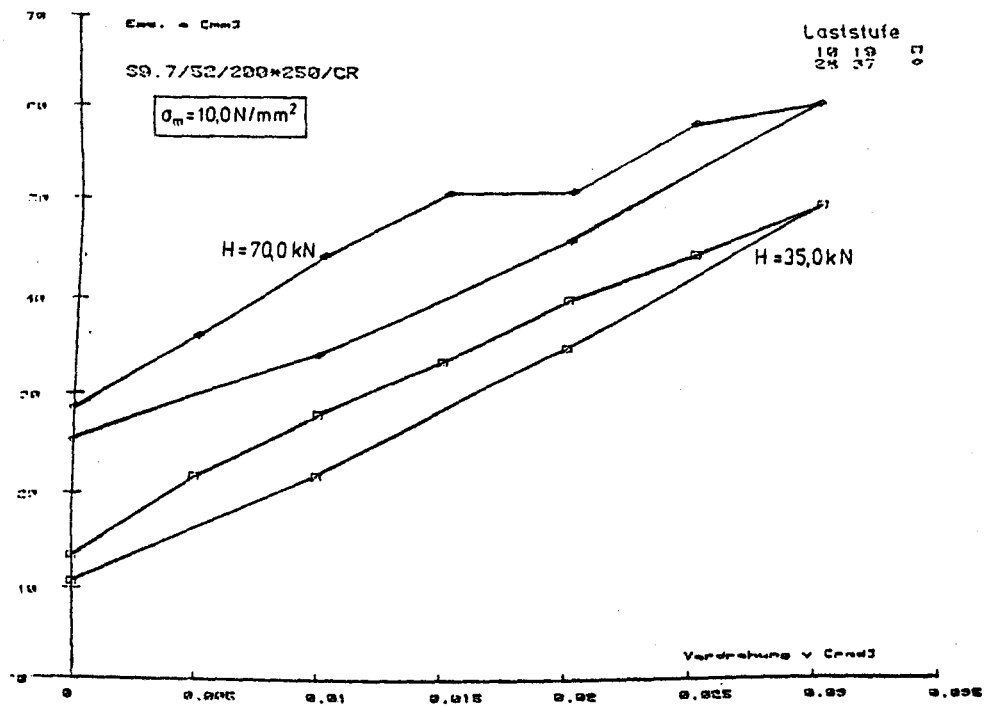


Bild:
 A 239

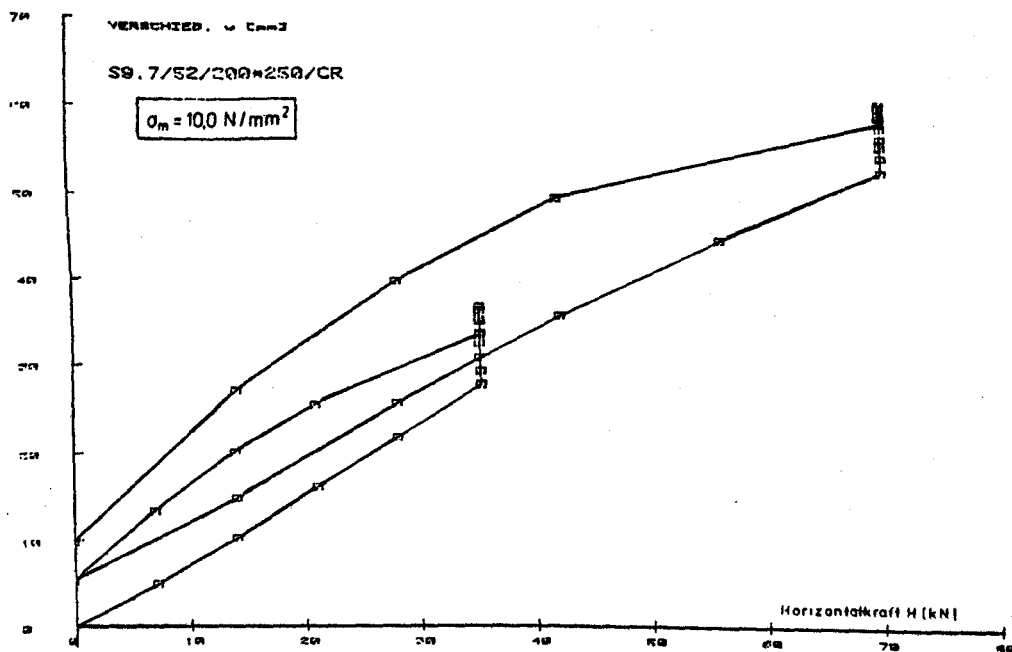


Bild:
 A 240

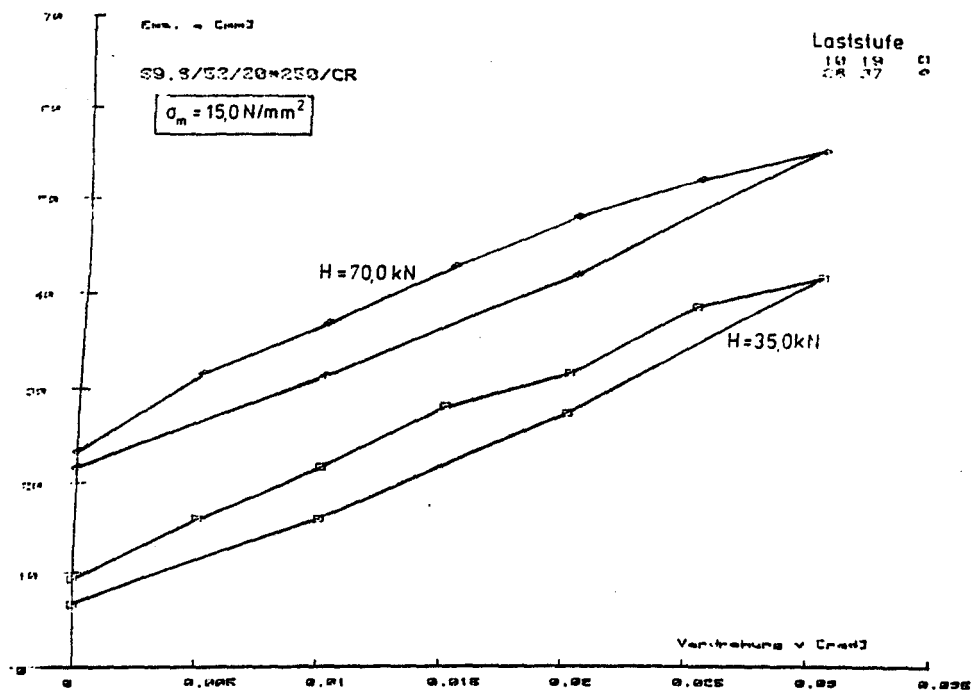


Bild:
 A 241

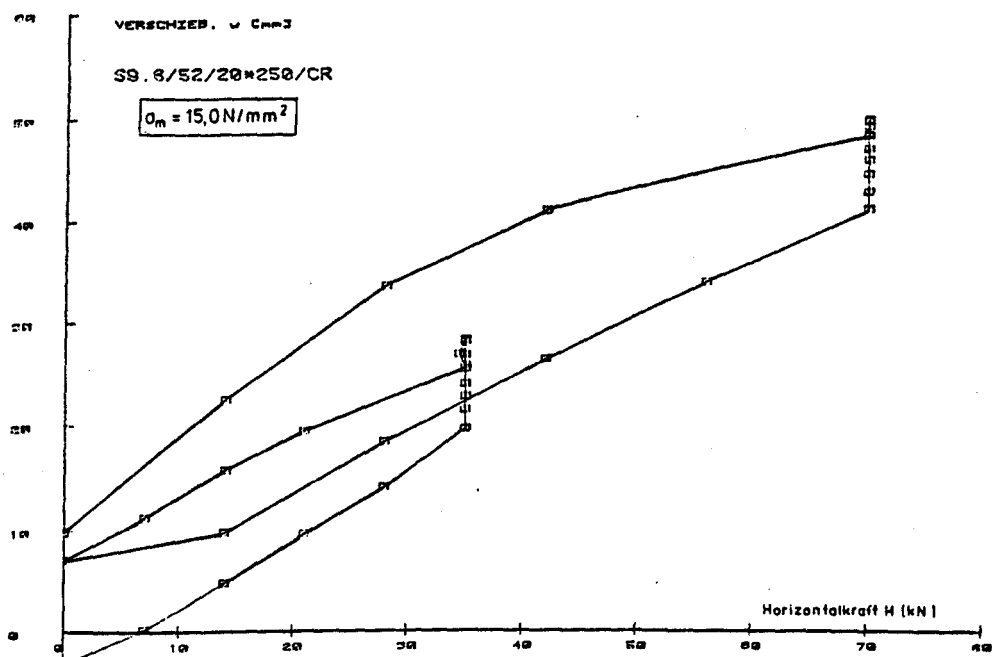
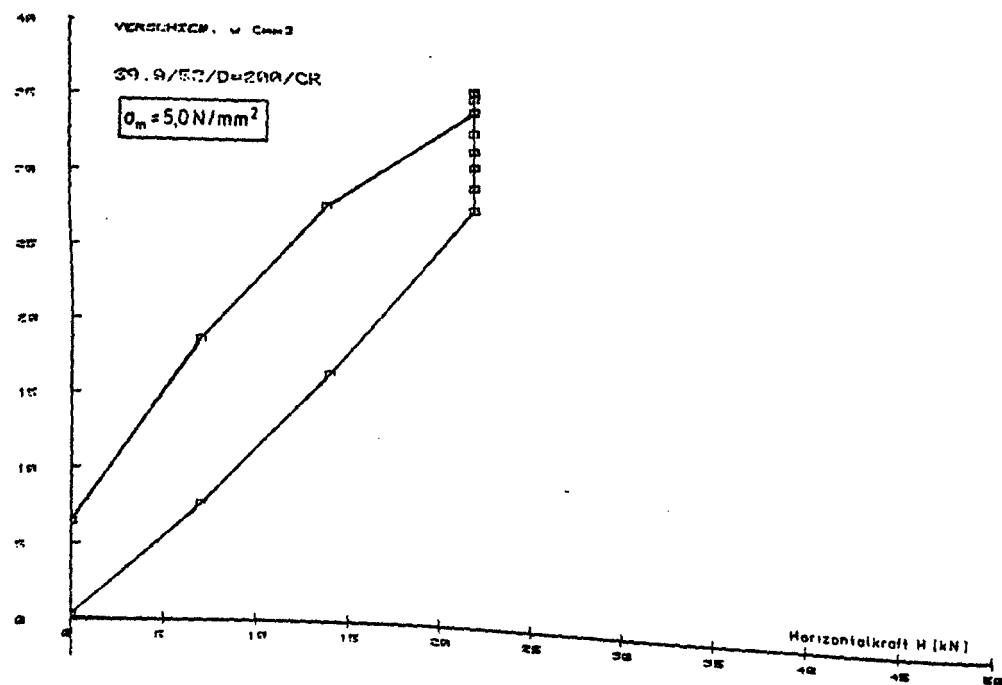
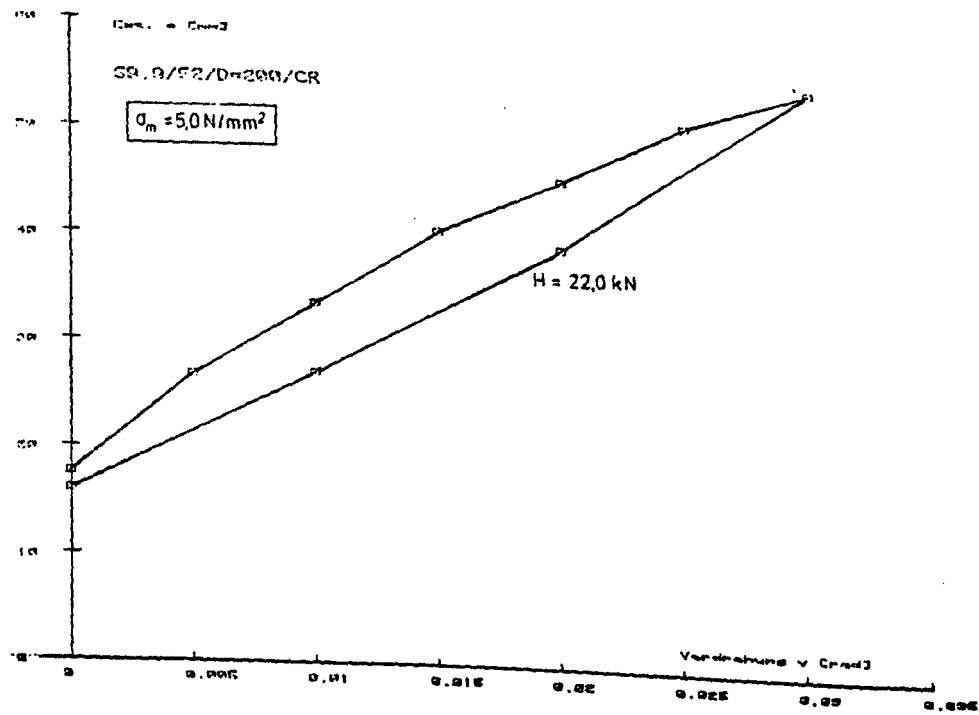


Bild:
 A 242



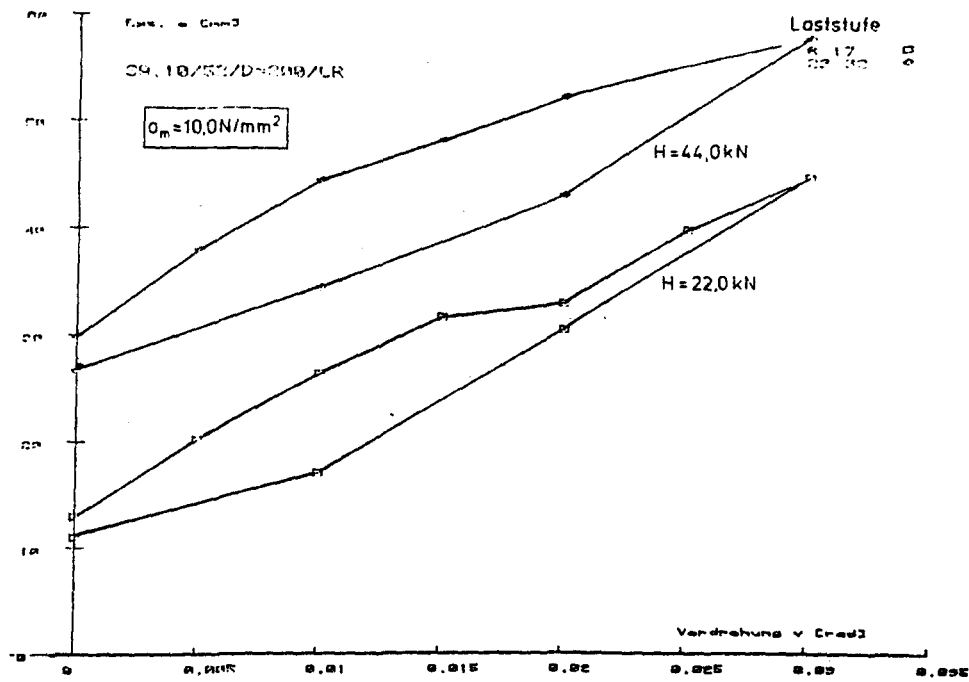


Bild:
 A 245

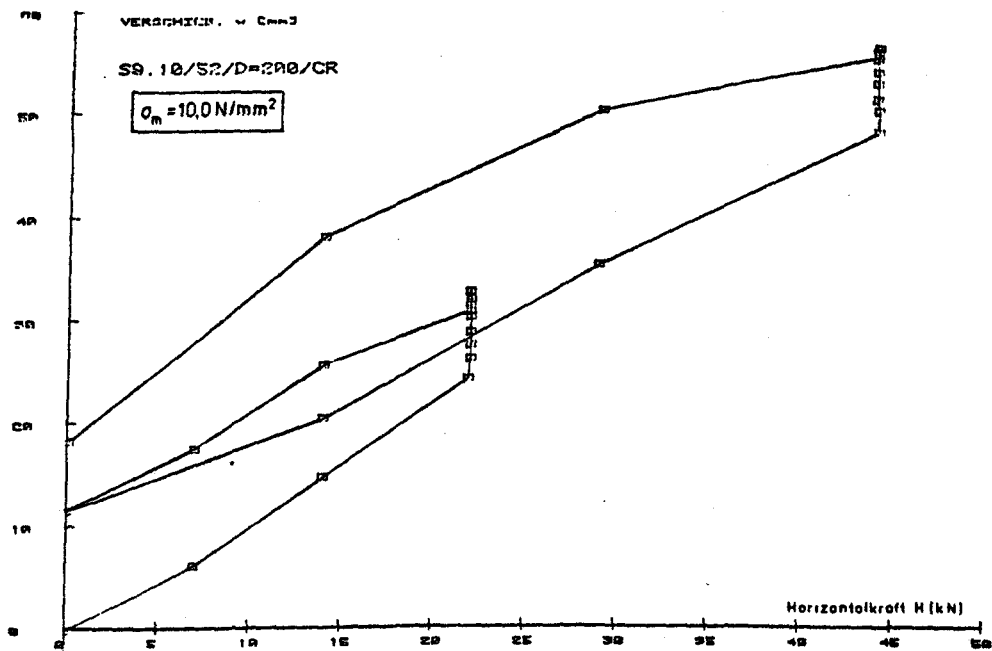


Bild:
 A 246

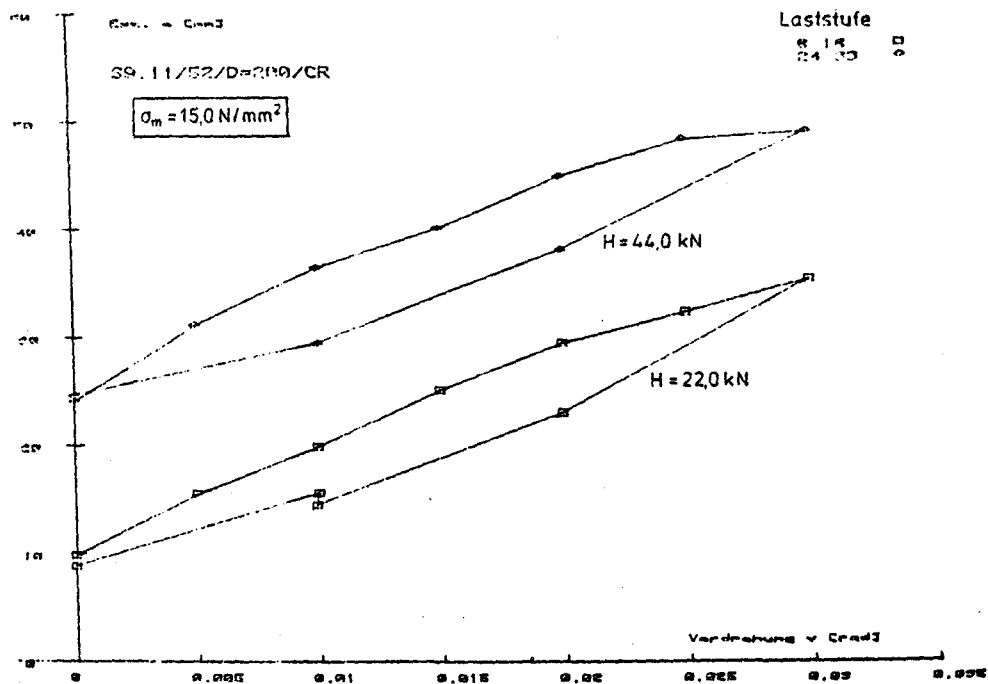


Bild:
A 247

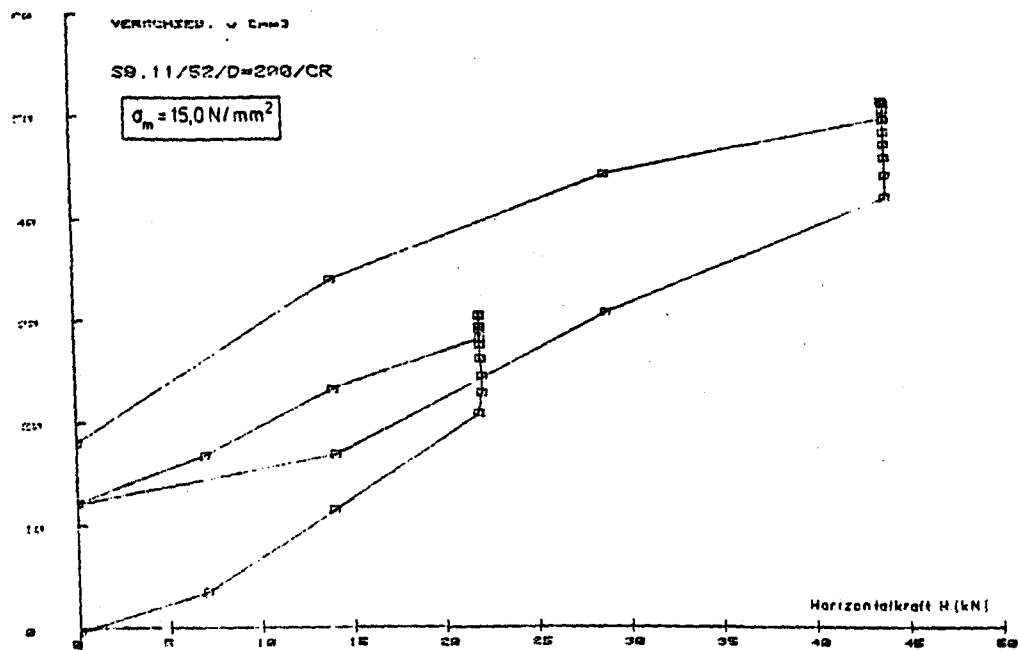


Bild:
A 248

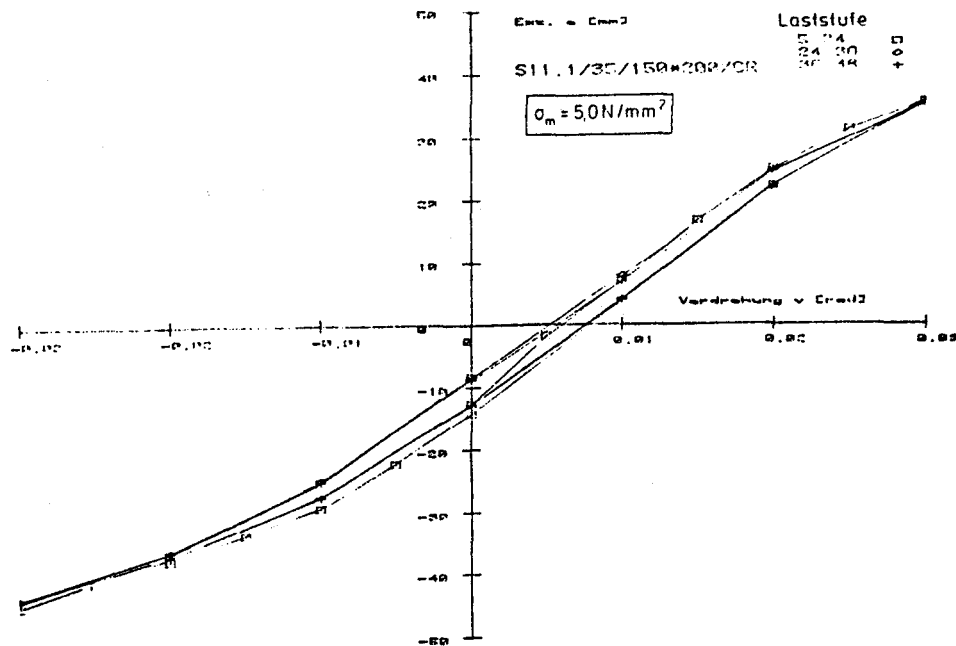


Bild:
 A 249

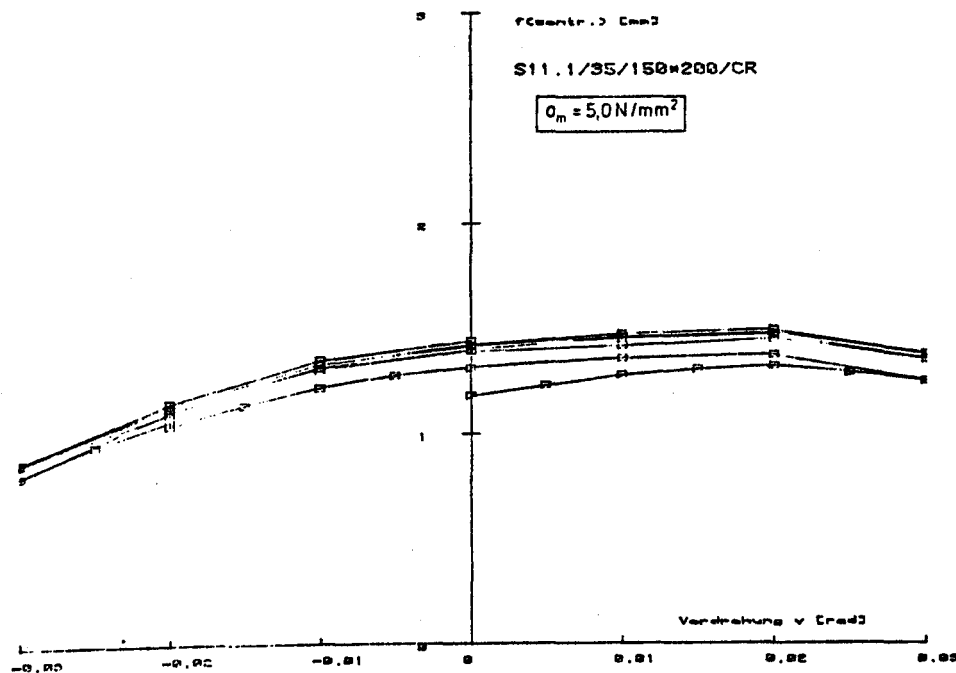


Bild:
 A 250

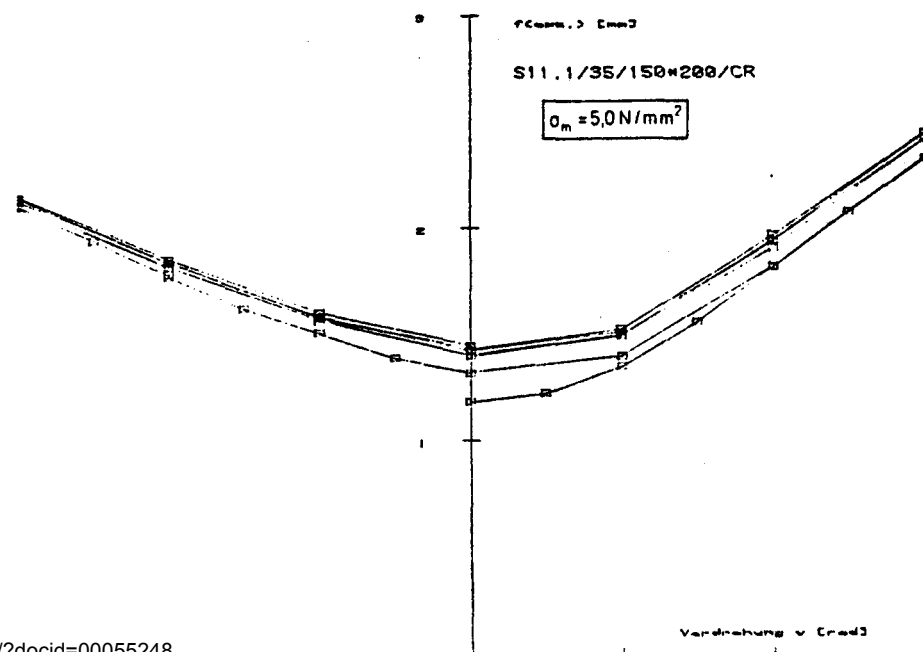


Bild:
 A 25

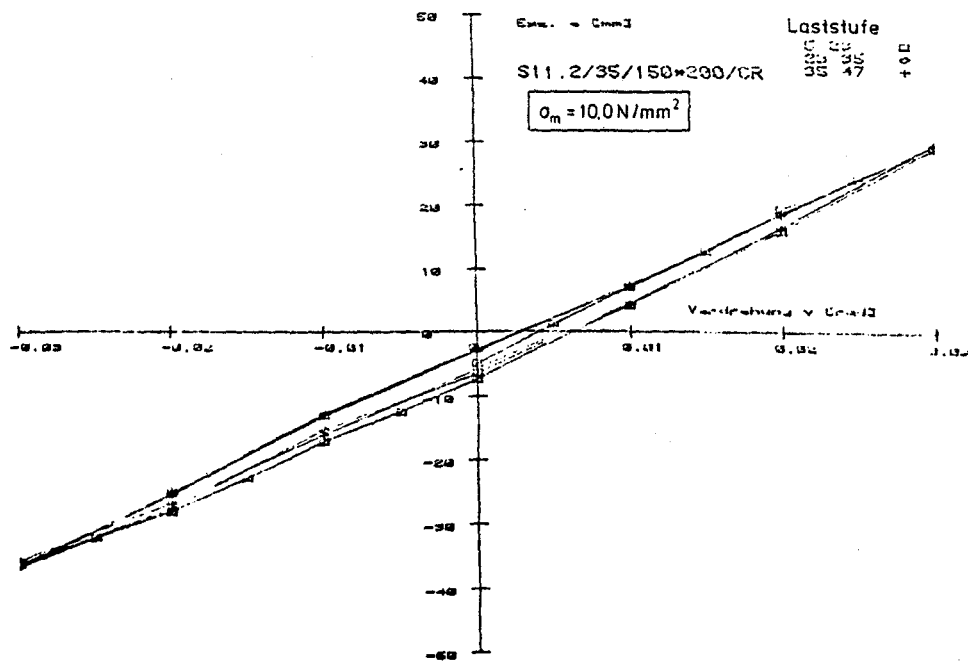


Bild:
A 252

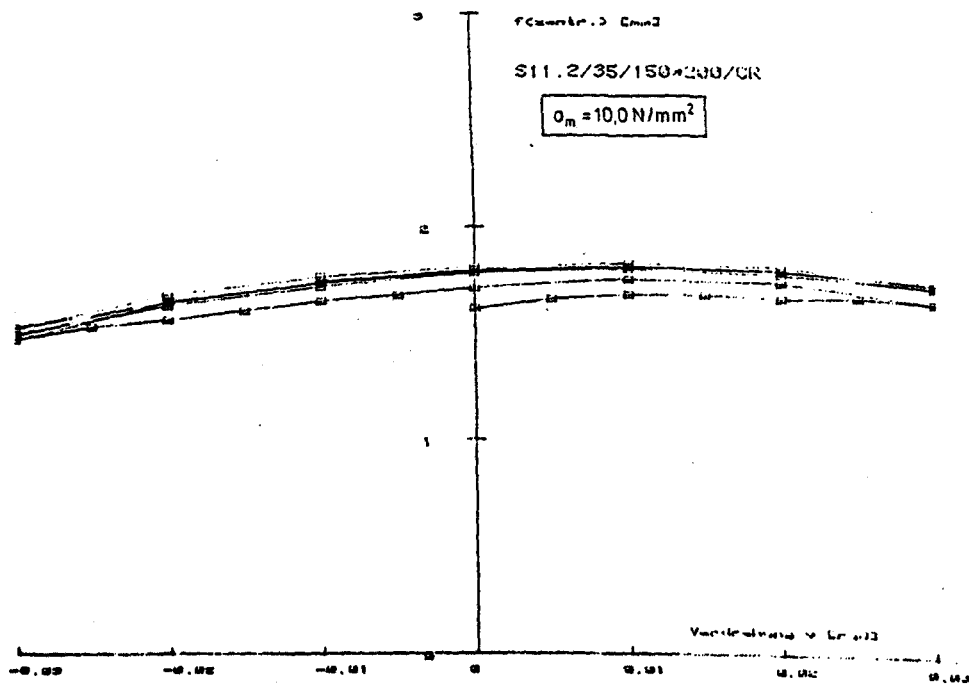


Bild:
A 253

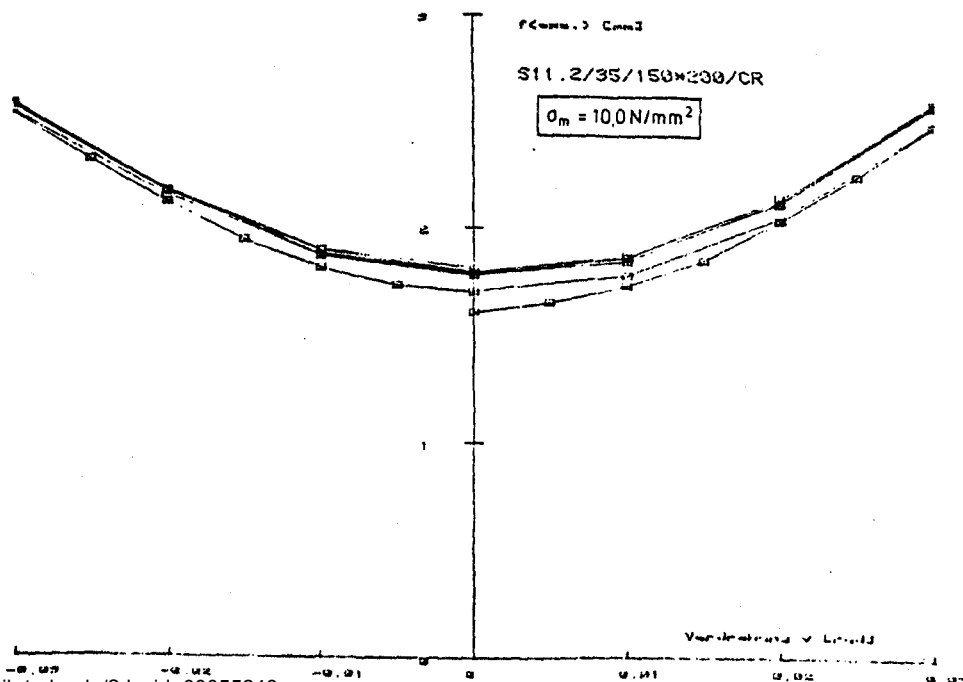


Bild:
A 254

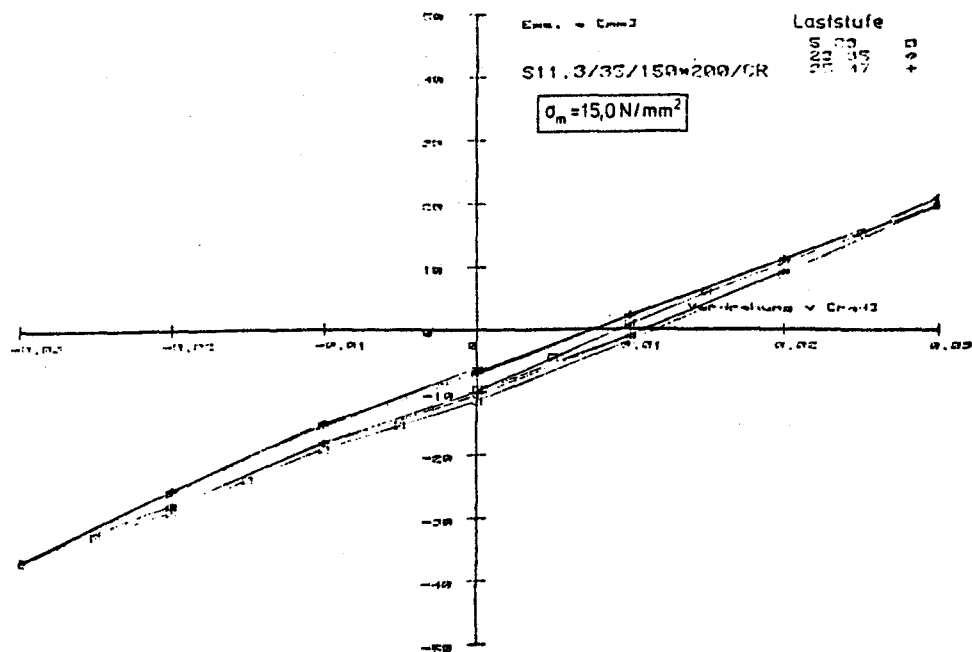


Bild:
 A 255

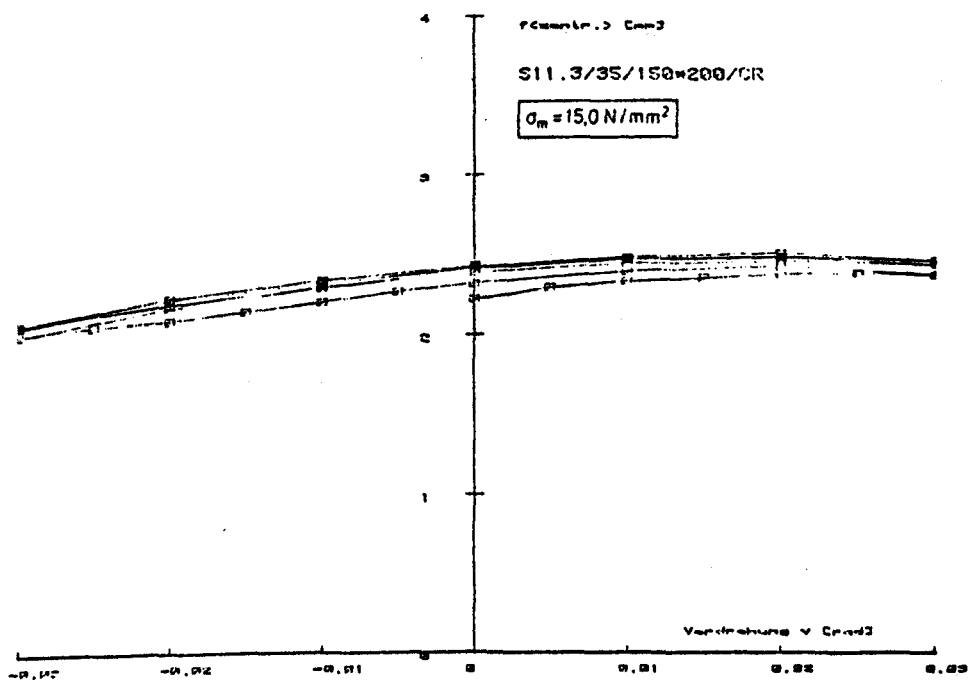


Bild:
 A 256

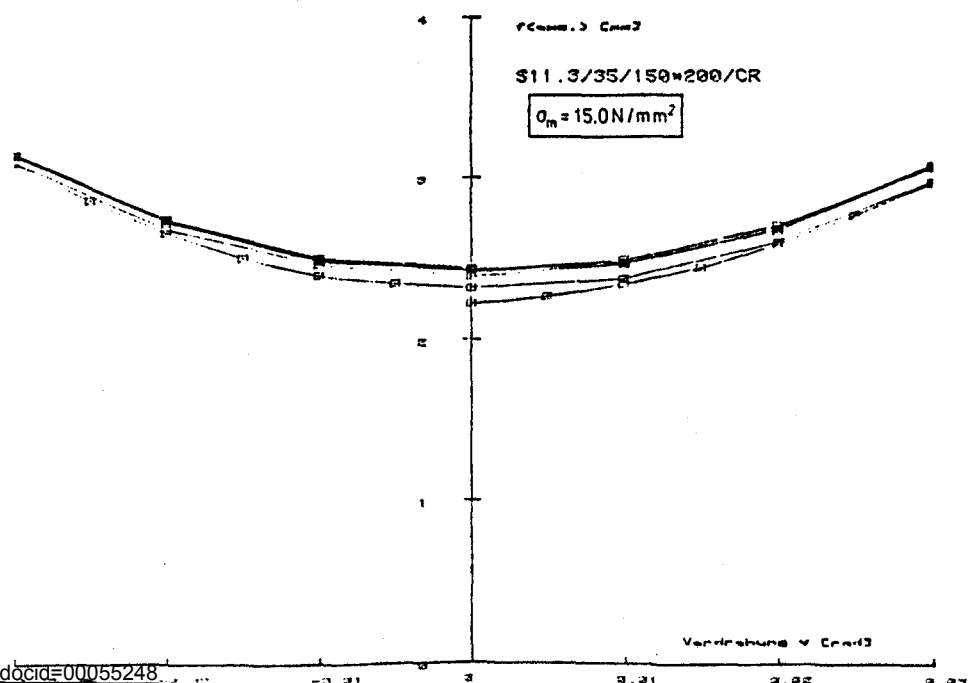


Bild:
 A 257

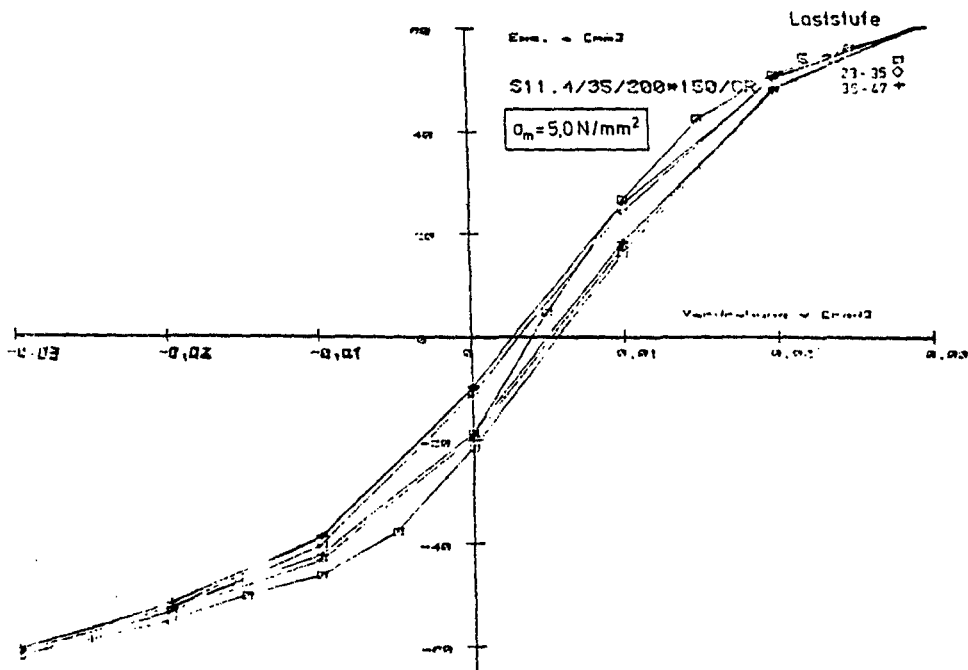


Bild:
A 258

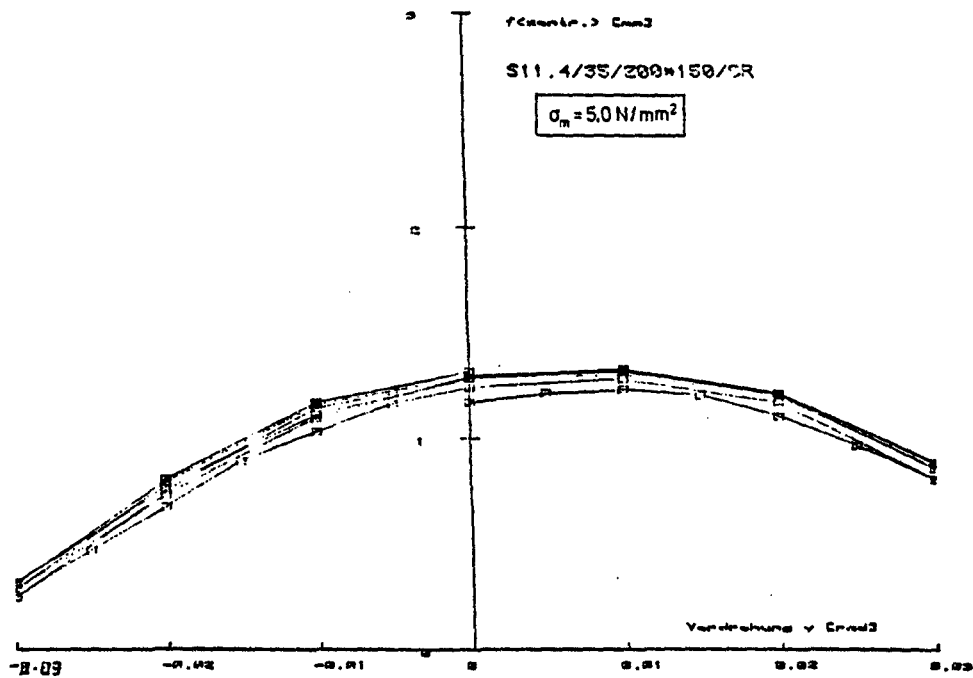


Bild:
A 259

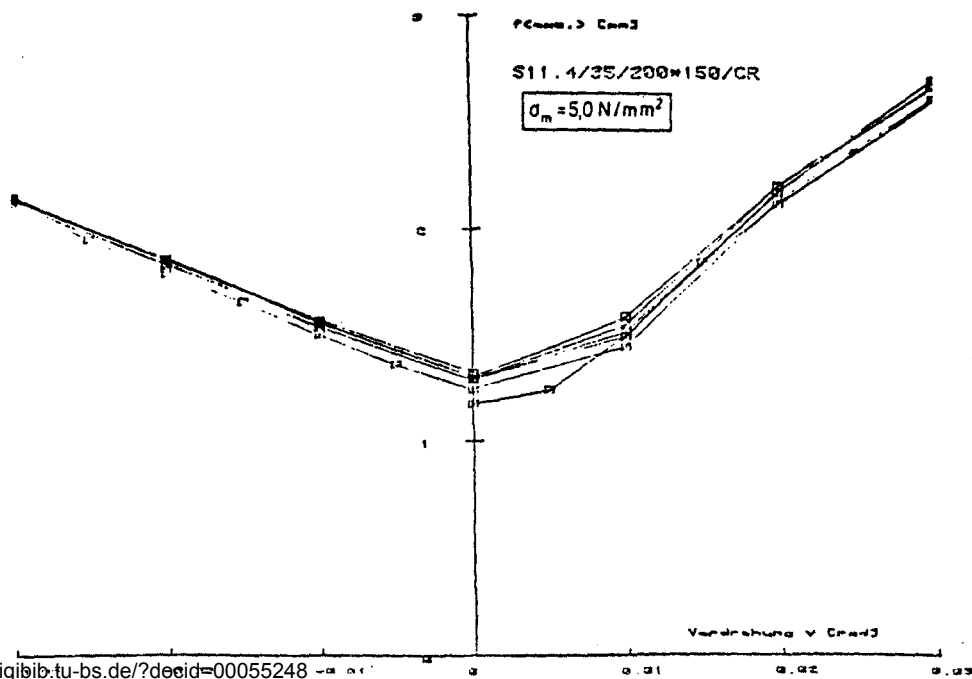


Bild:
A 260

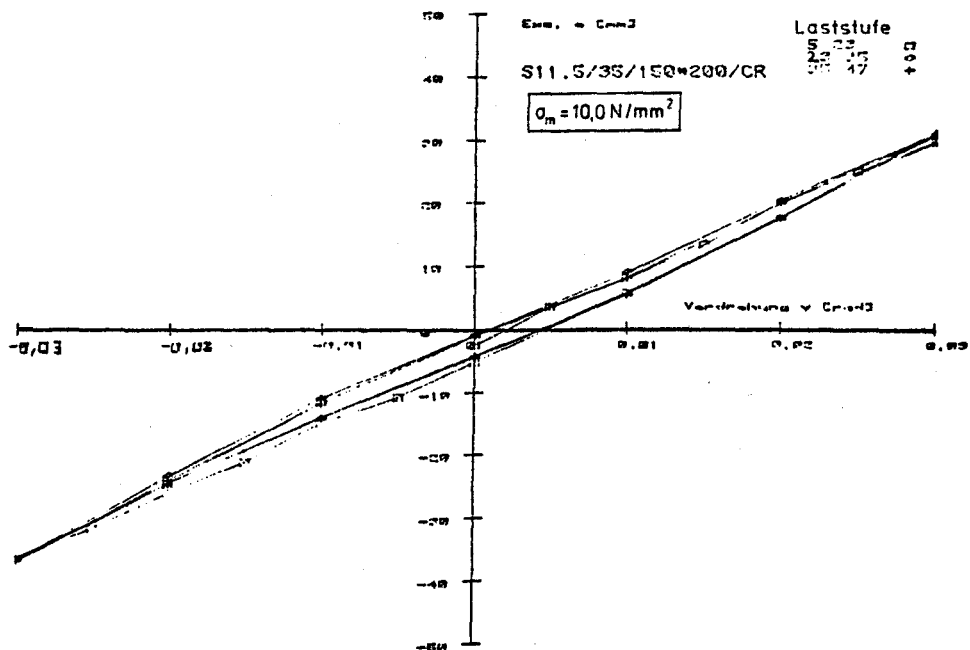


Bild:
 A 261

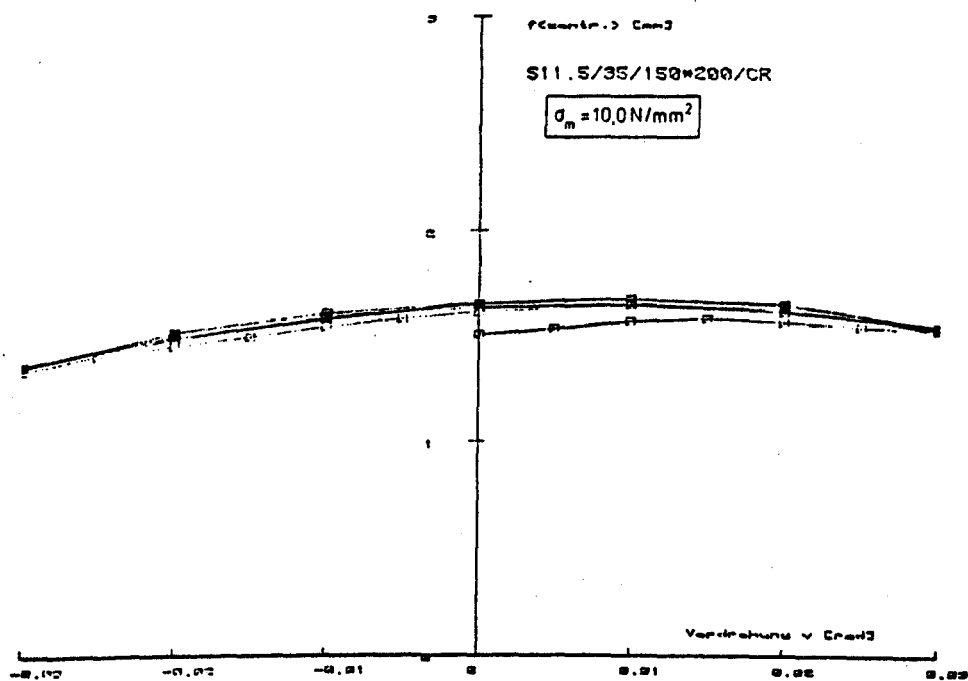


Bild:
 A 262

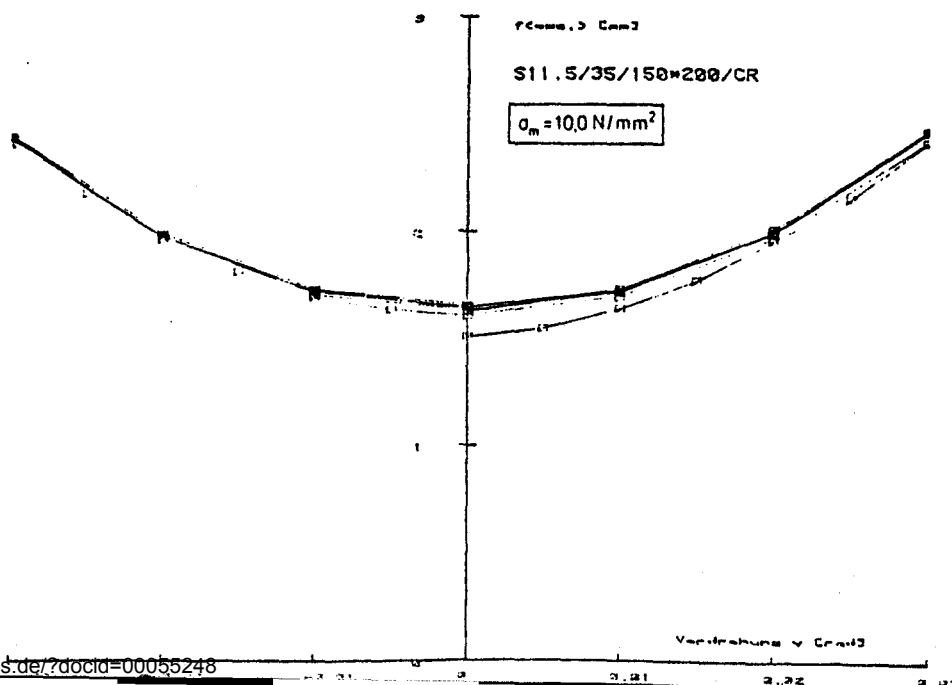


Bild:
 A 263

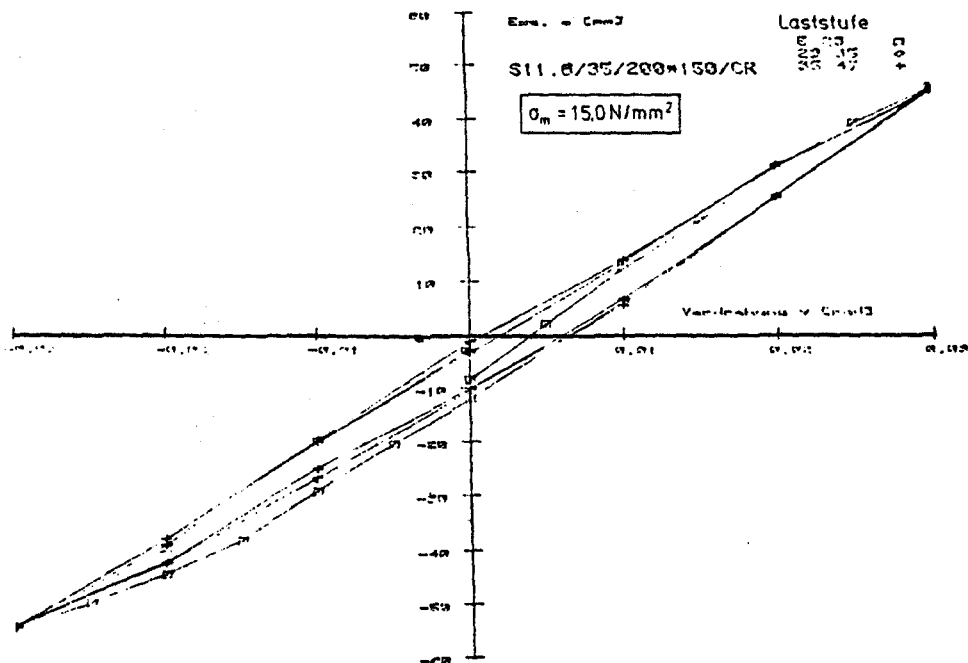


Bild:
 A 264

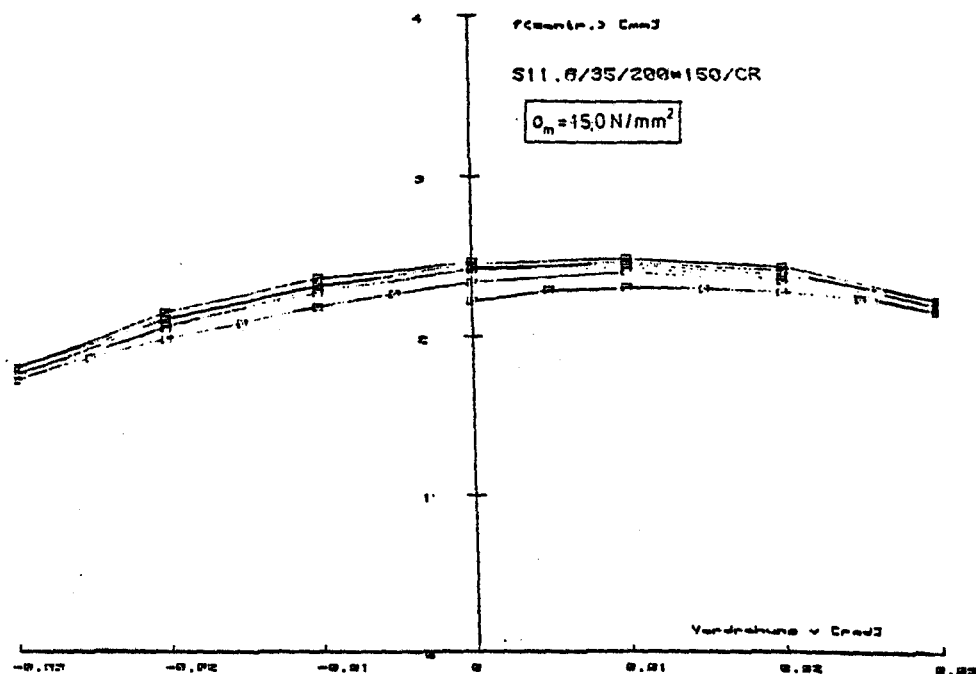


Bild:
 A 265

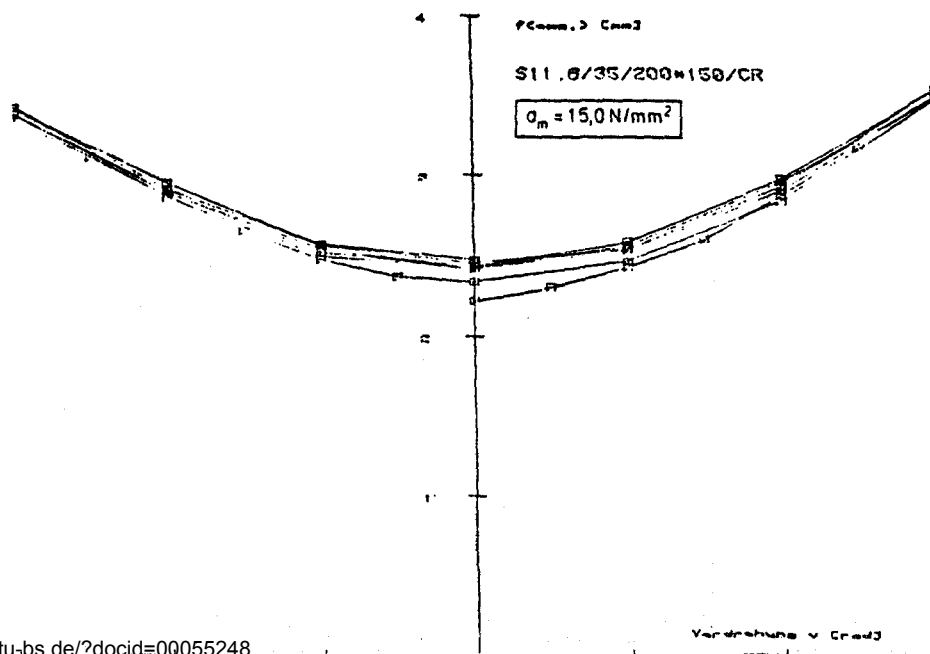


Bild:
 A 266

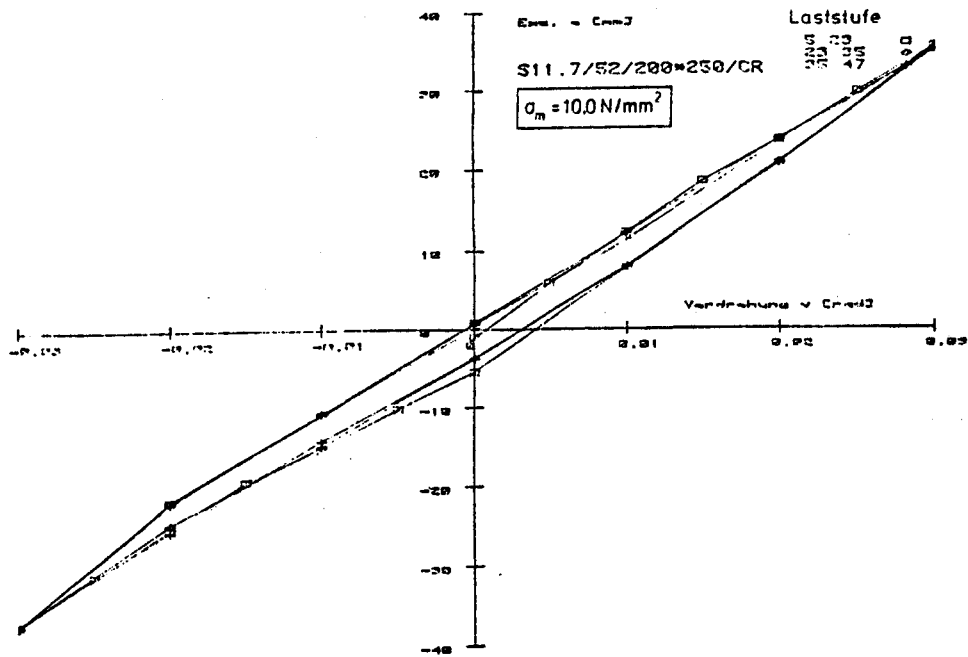


Bild:
A 267

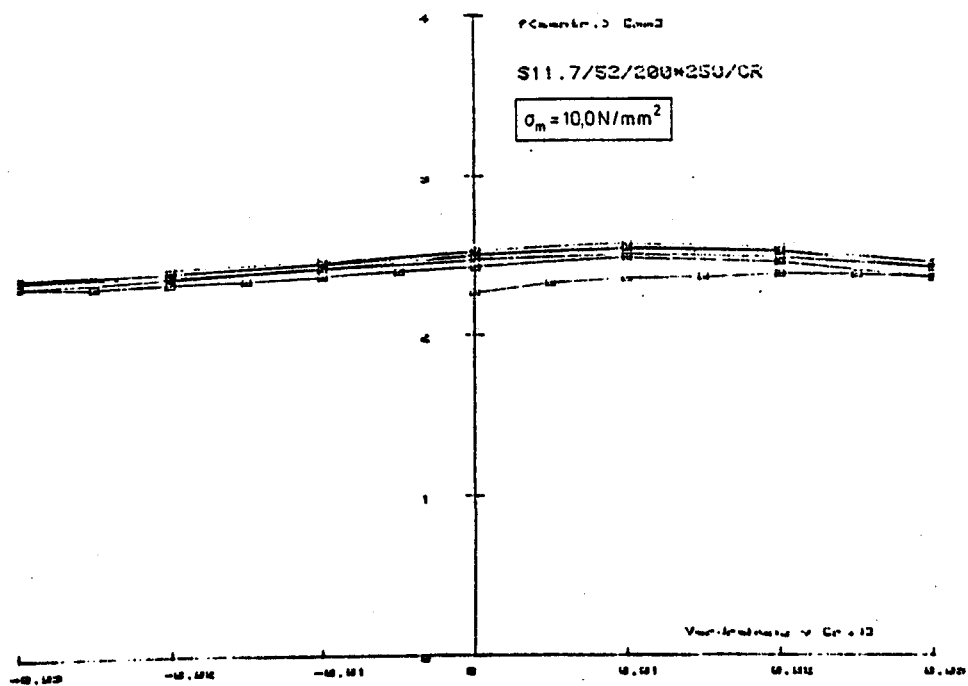


Bild:
A 268

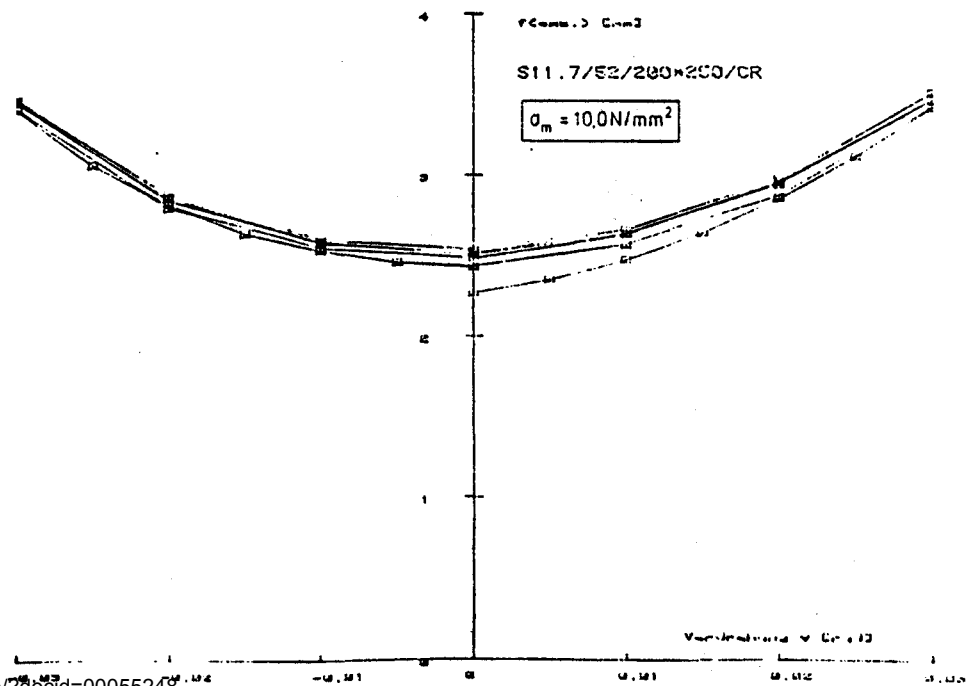


Bild:
A 269

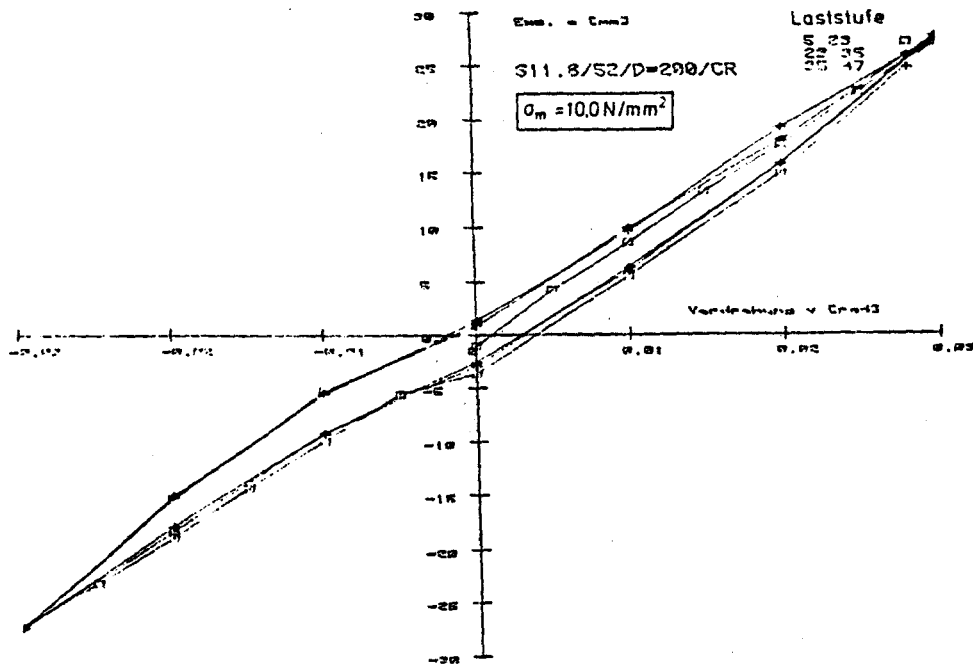


Bild:
 A 270

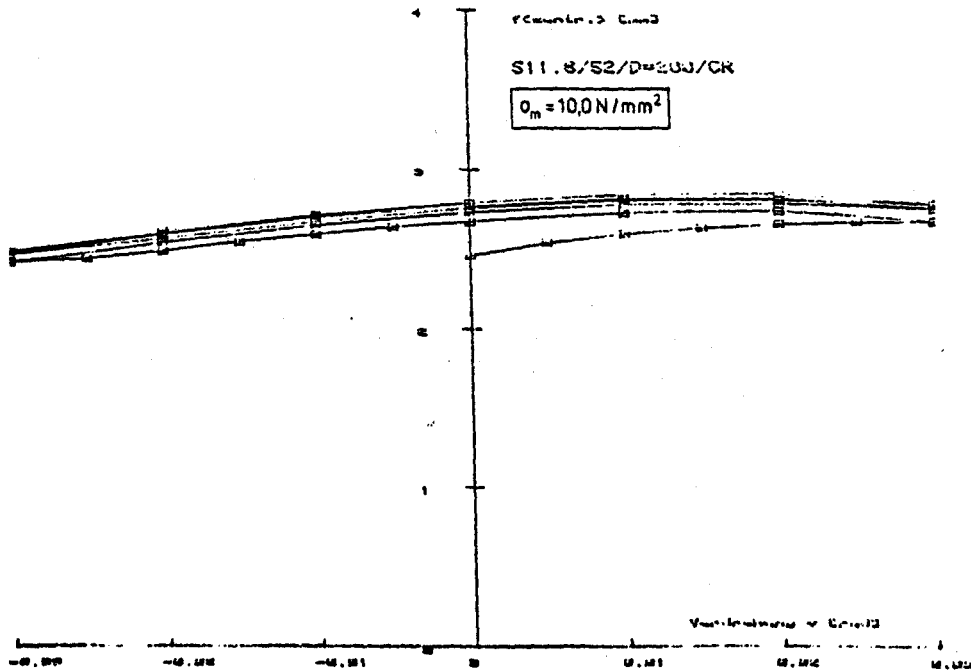


Bild:
 A 271

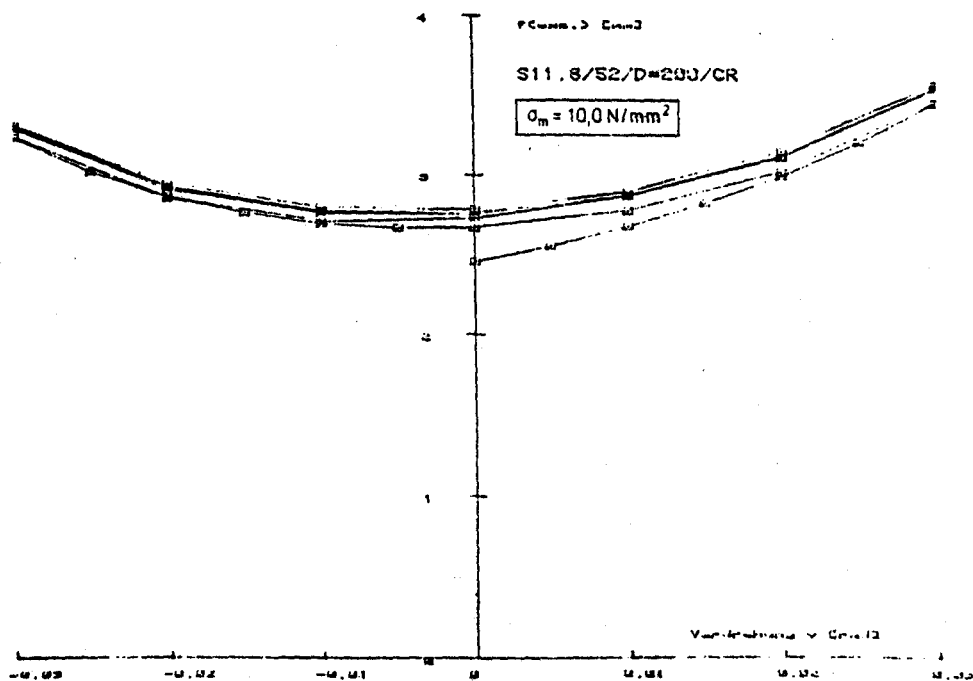


Bild:
 A 272

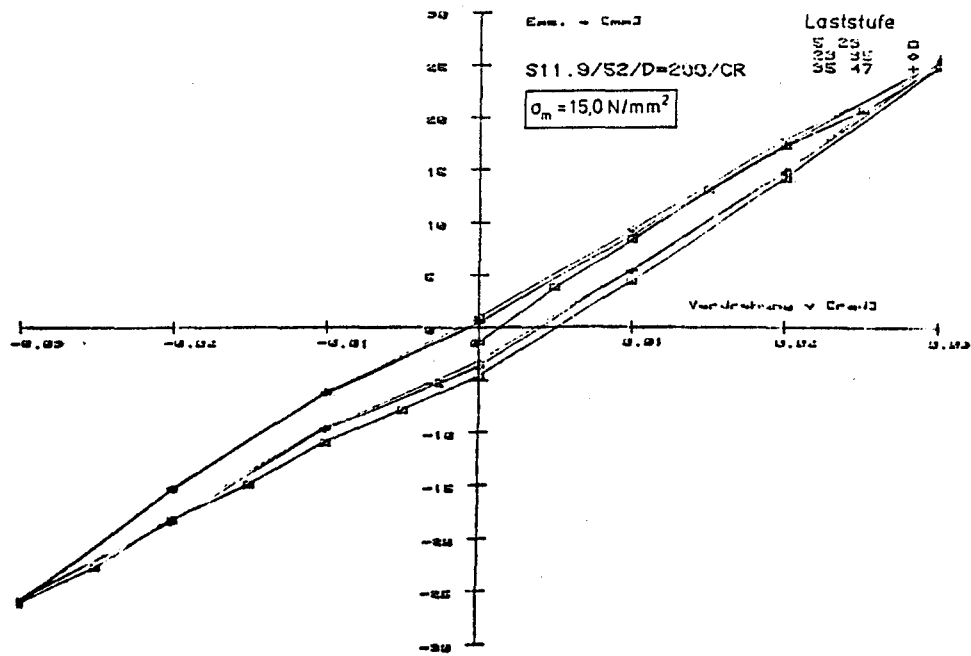


Bild:
A 273

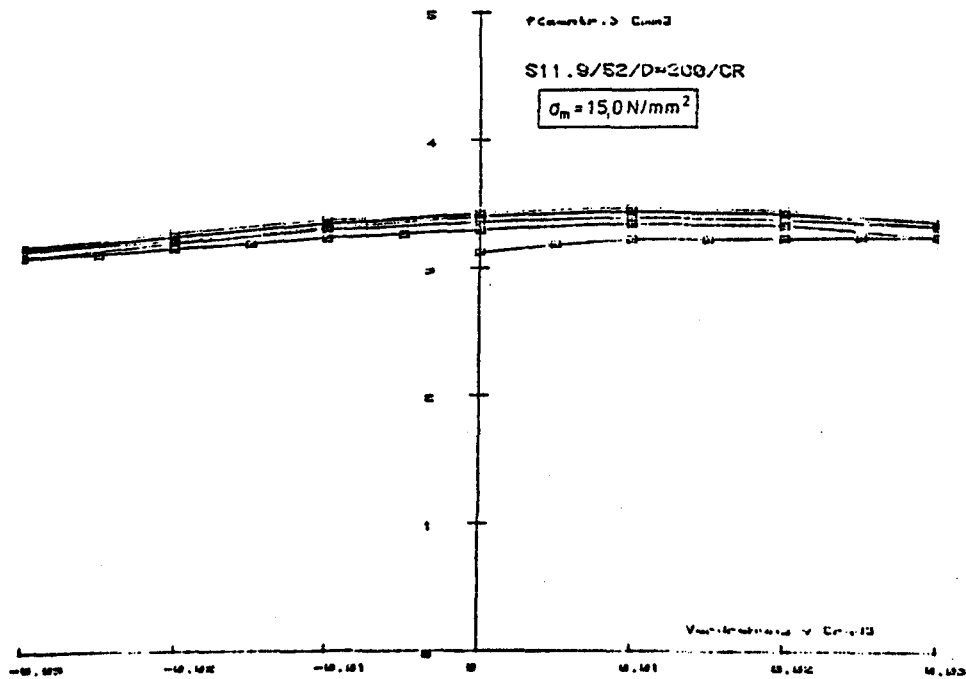


Bild:
A 274

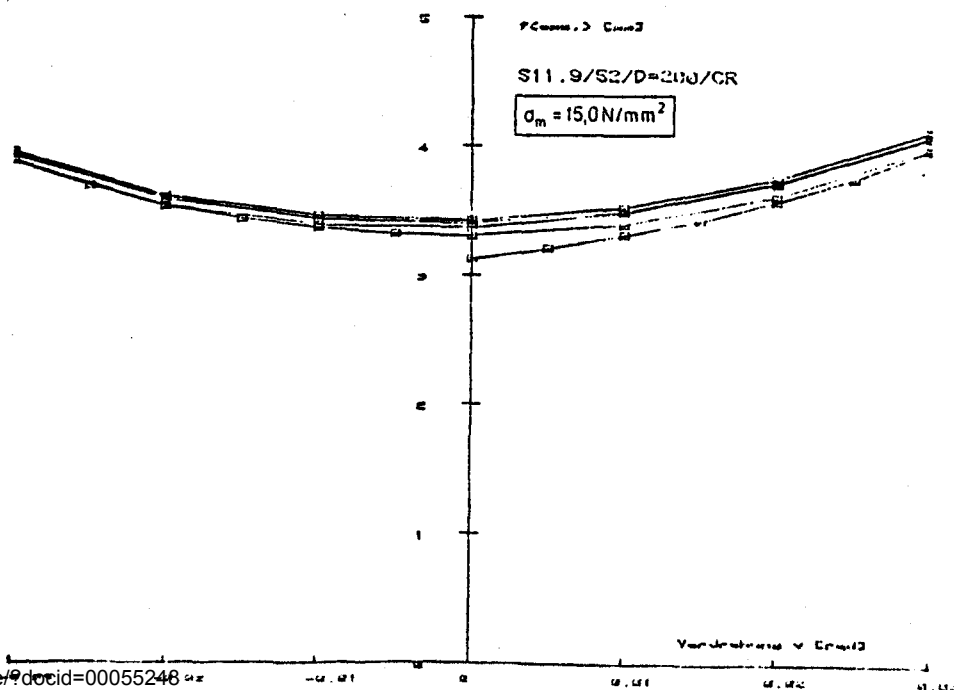


Bild:
A 275

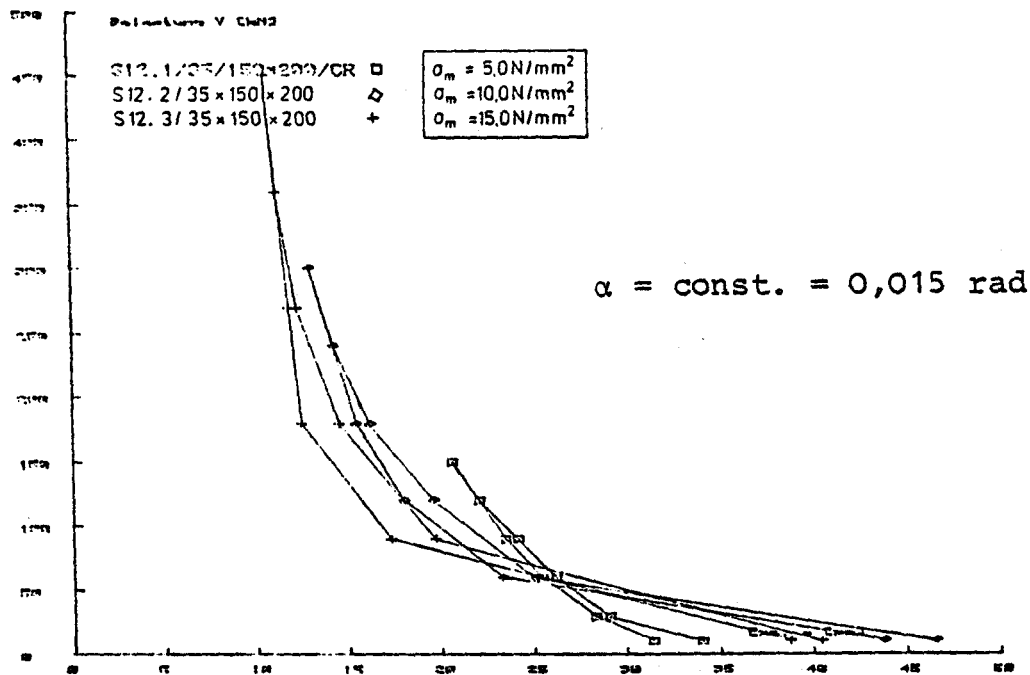


Bild:
A 276

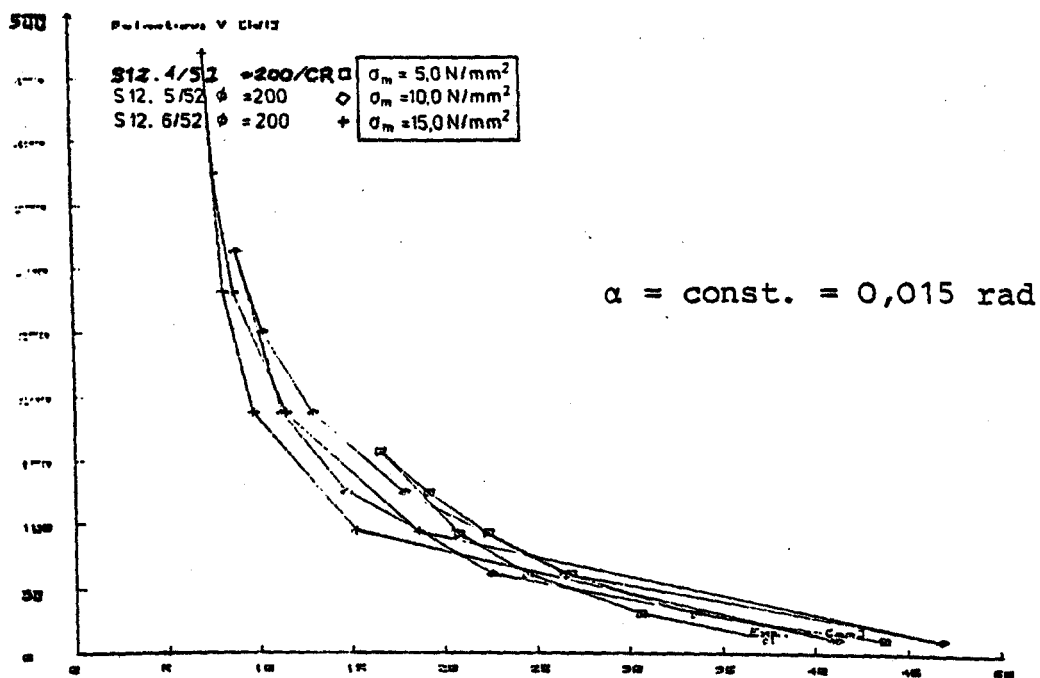
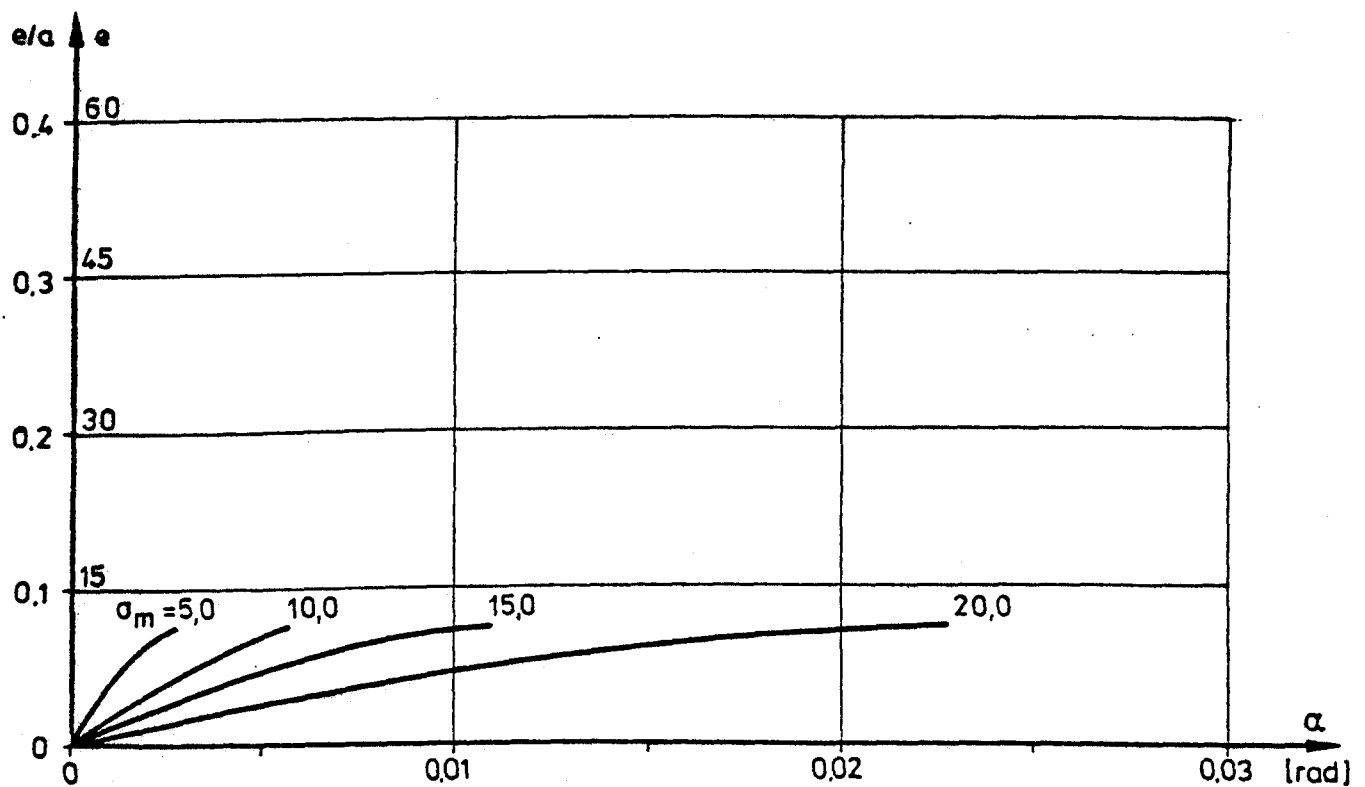
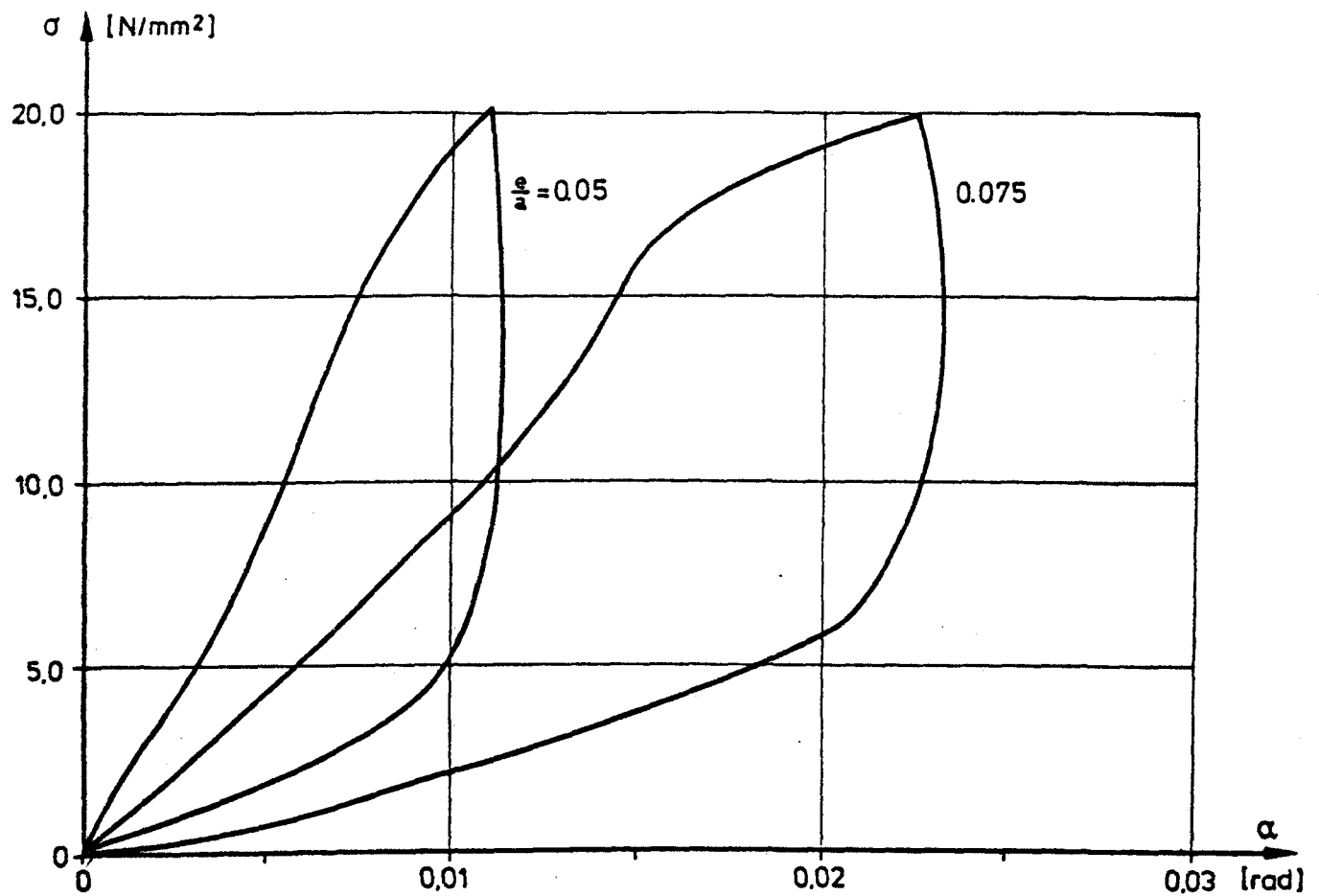
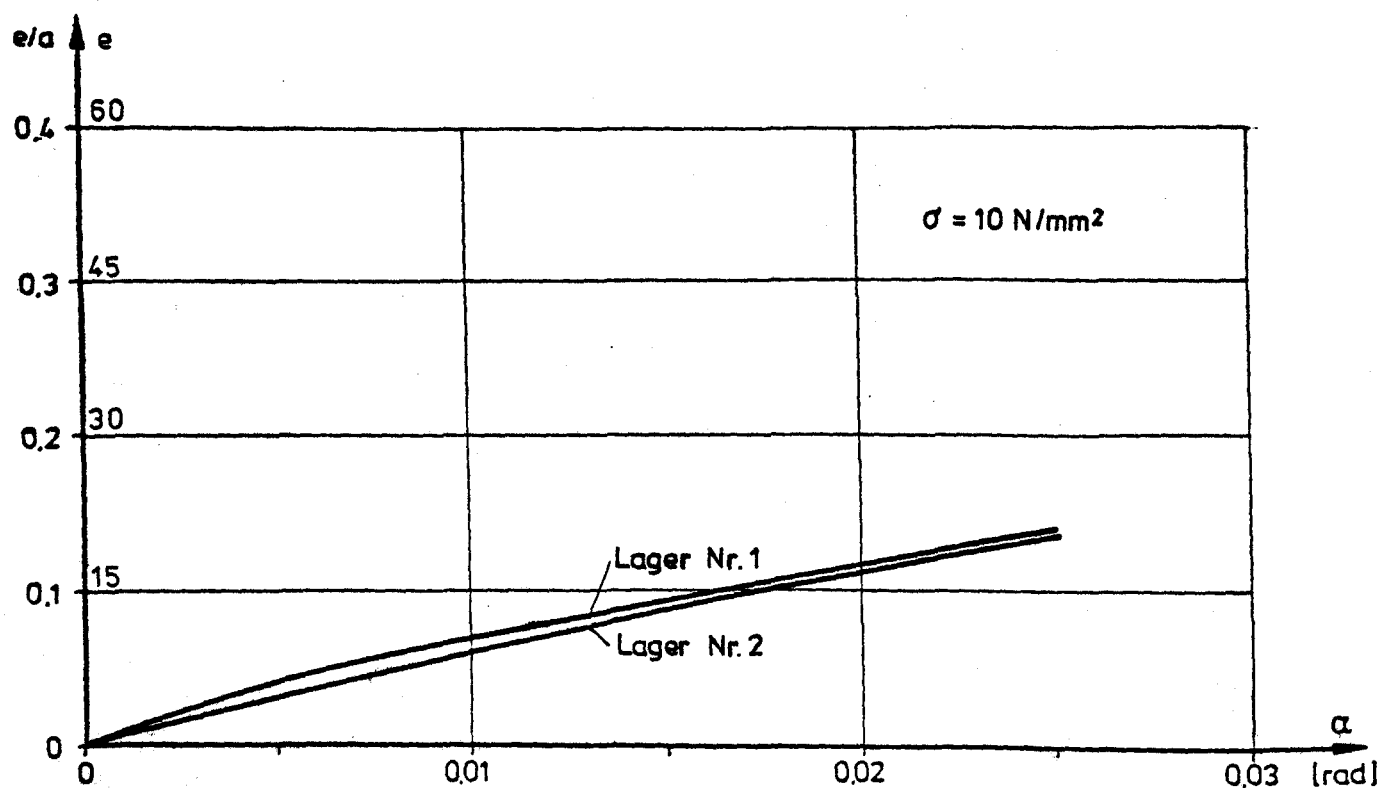
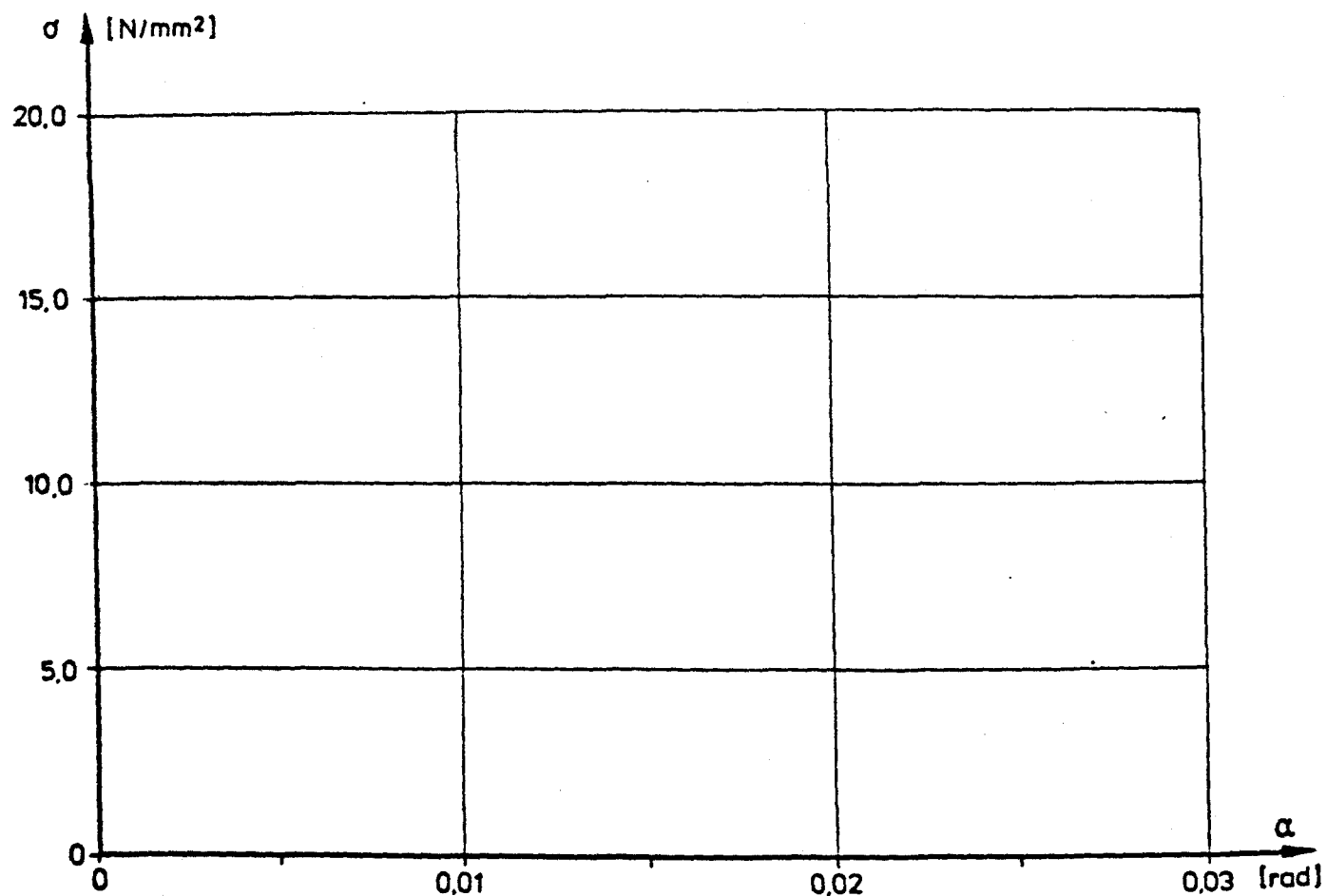


Bild:
A 277



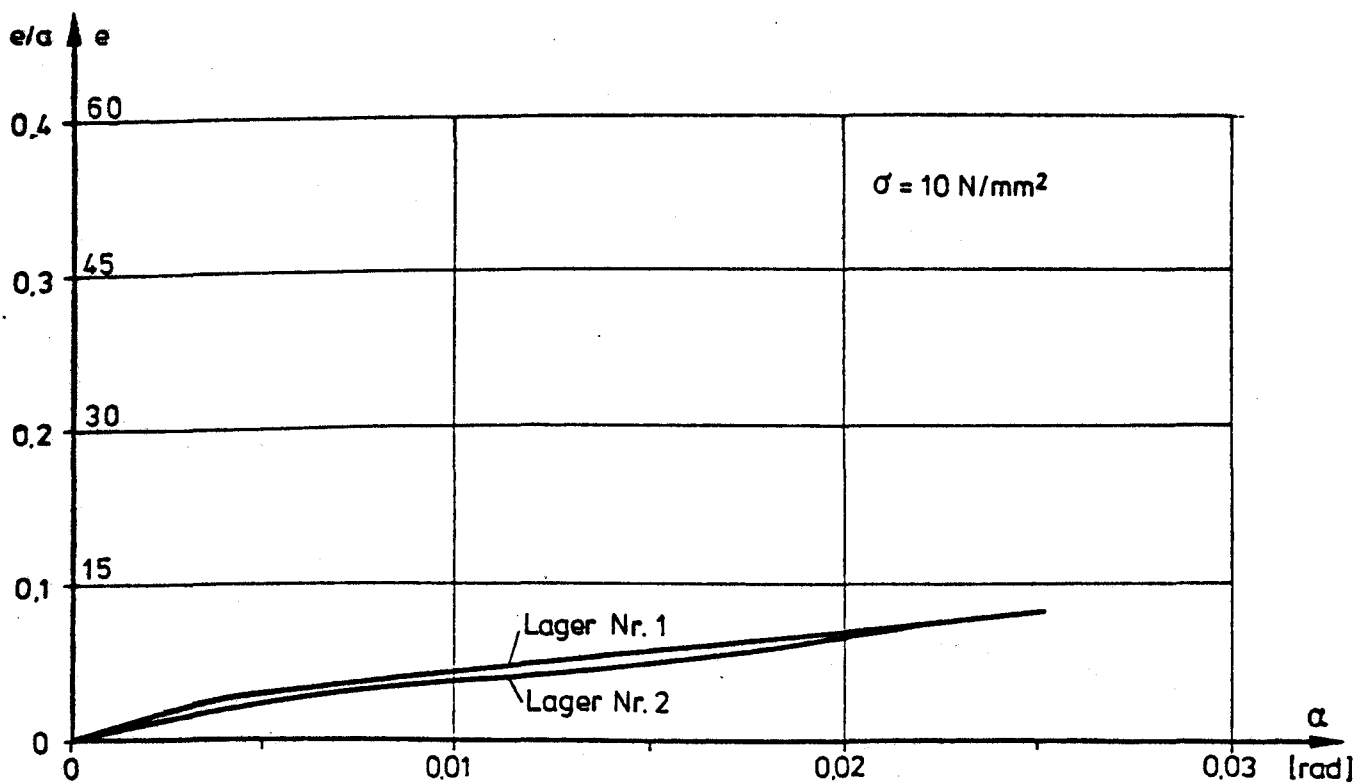
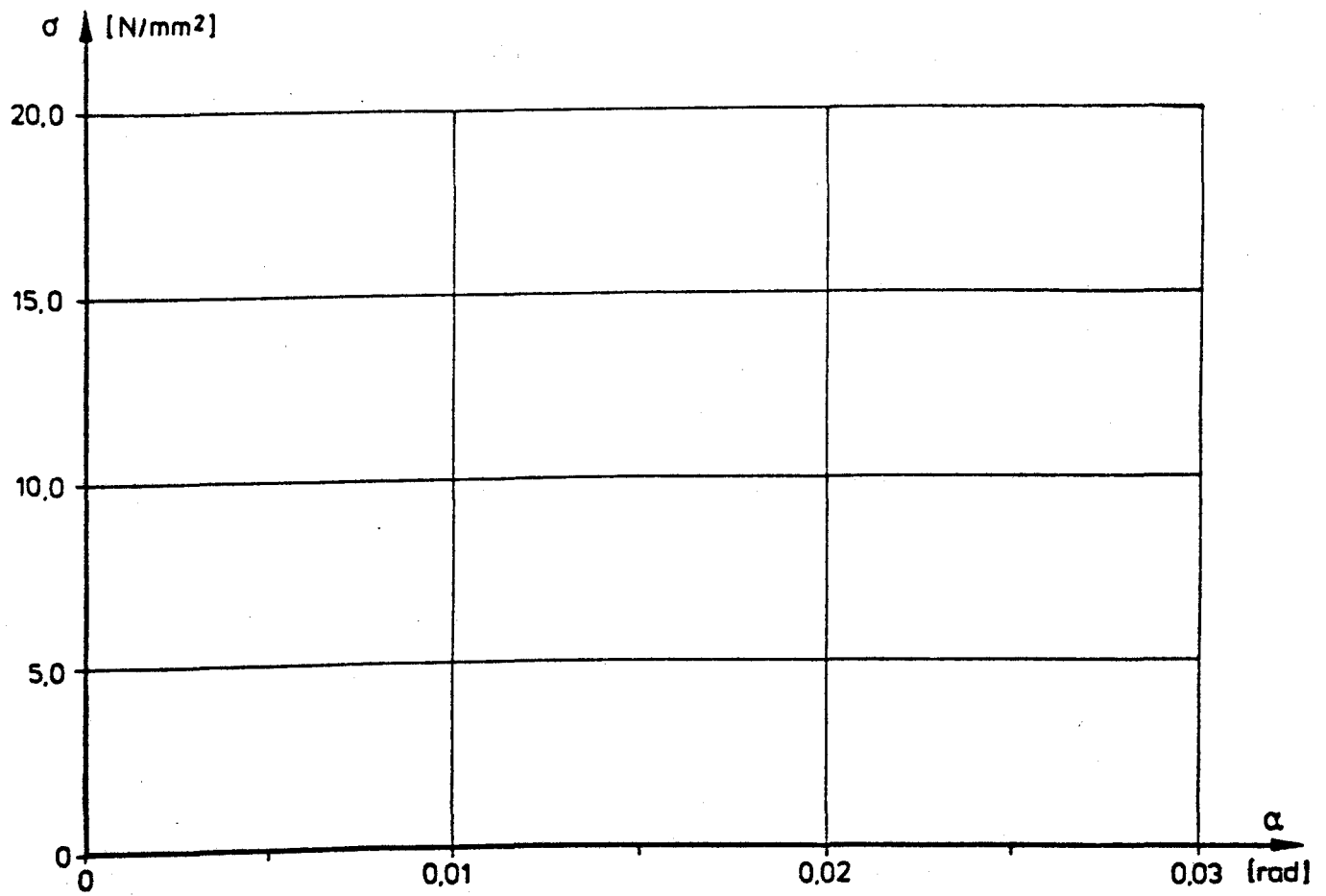
$a \times b \times d = 150 \times 200 \times 62 \text{ mm}$ ($t = 4 \times 10.9 = 43.5$)

B I L D : A 2 7 8



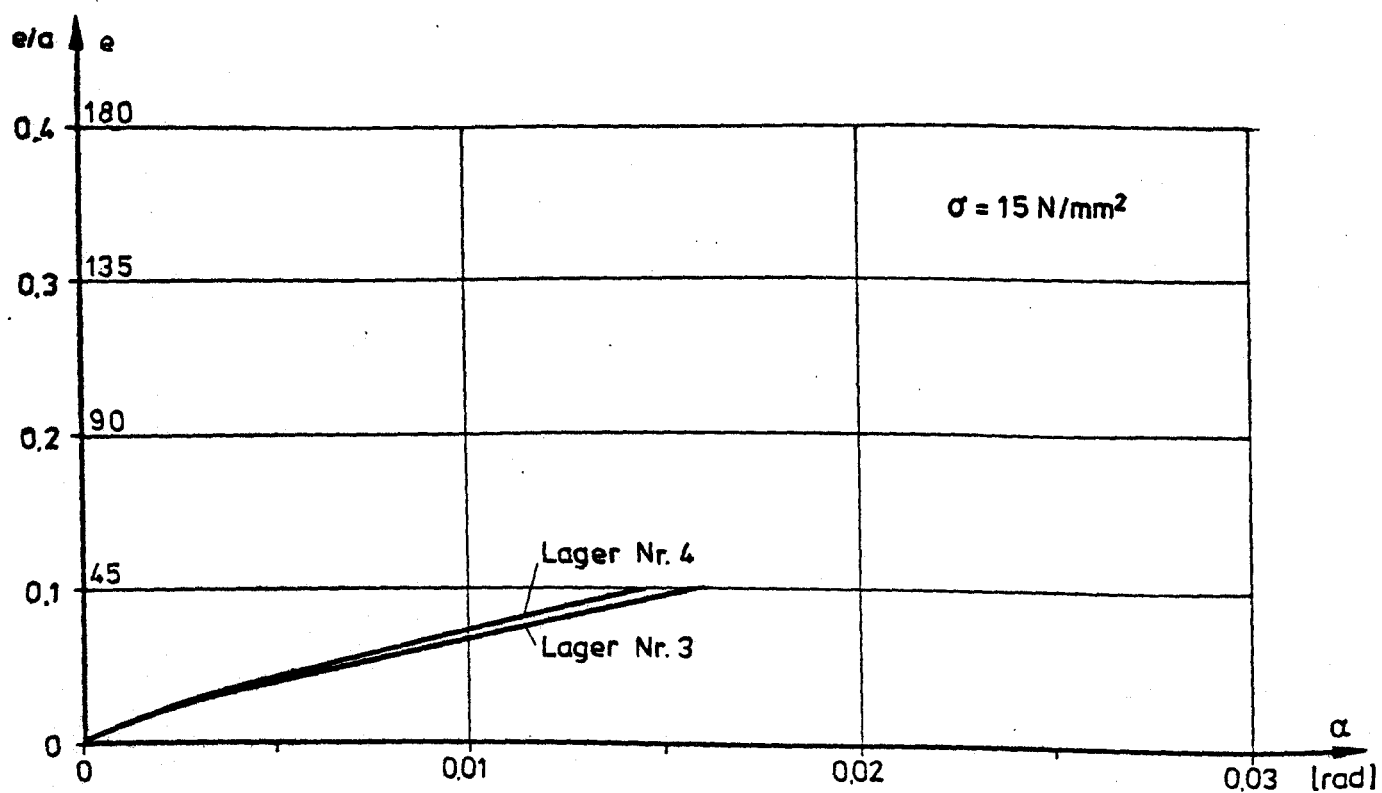
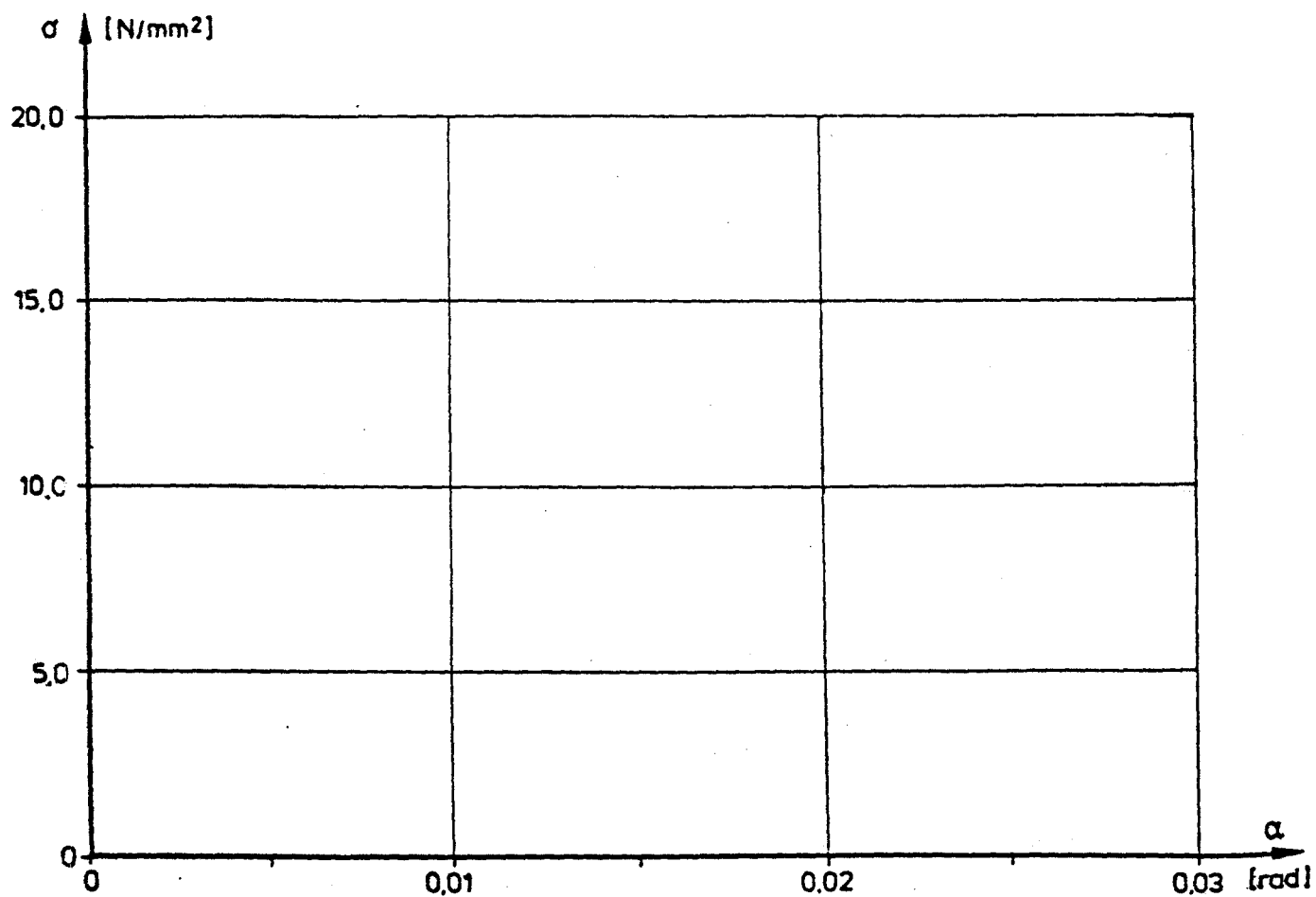
$a \times b \times d = 150 \times 200 \times 63 \text{ mm}$ ($t = 7 \times 6 = 42$)

B I L D : A 2 7 9



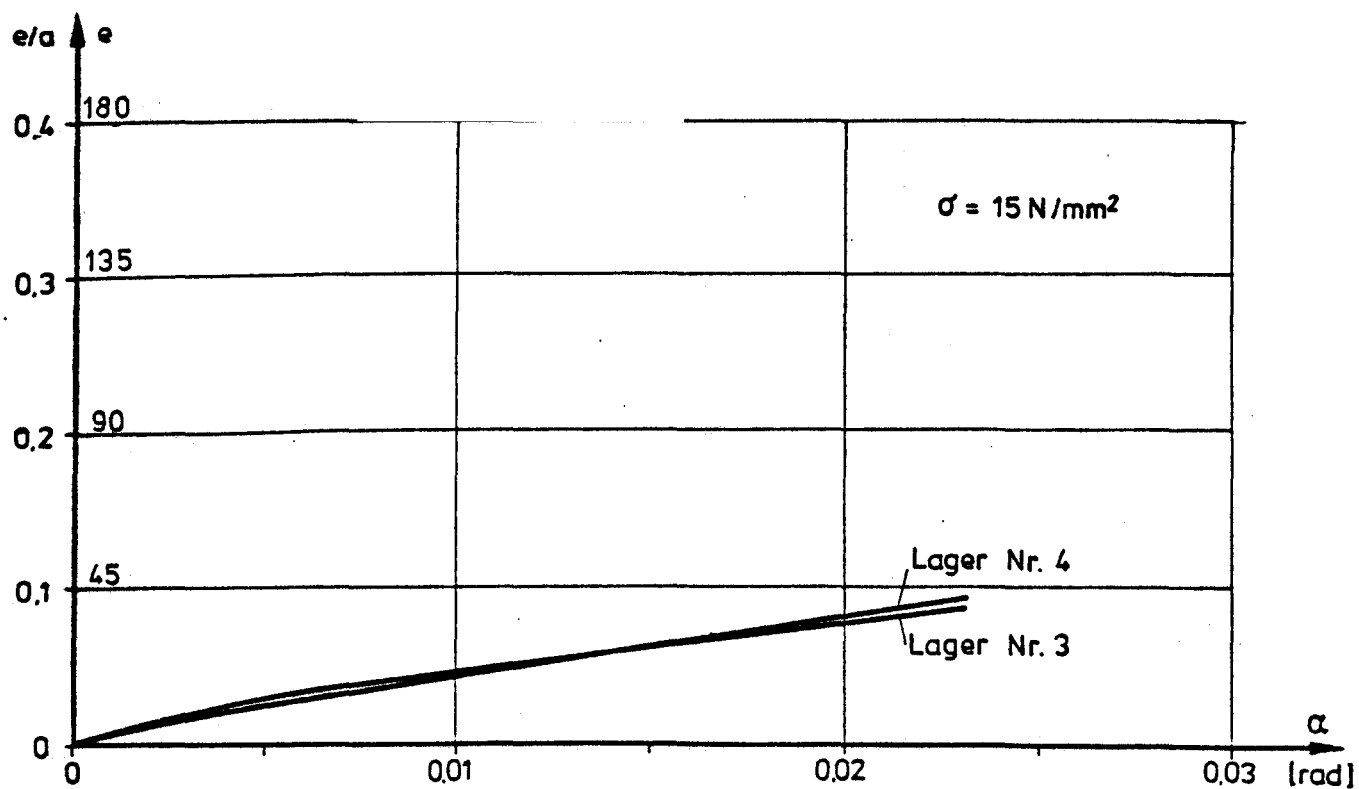
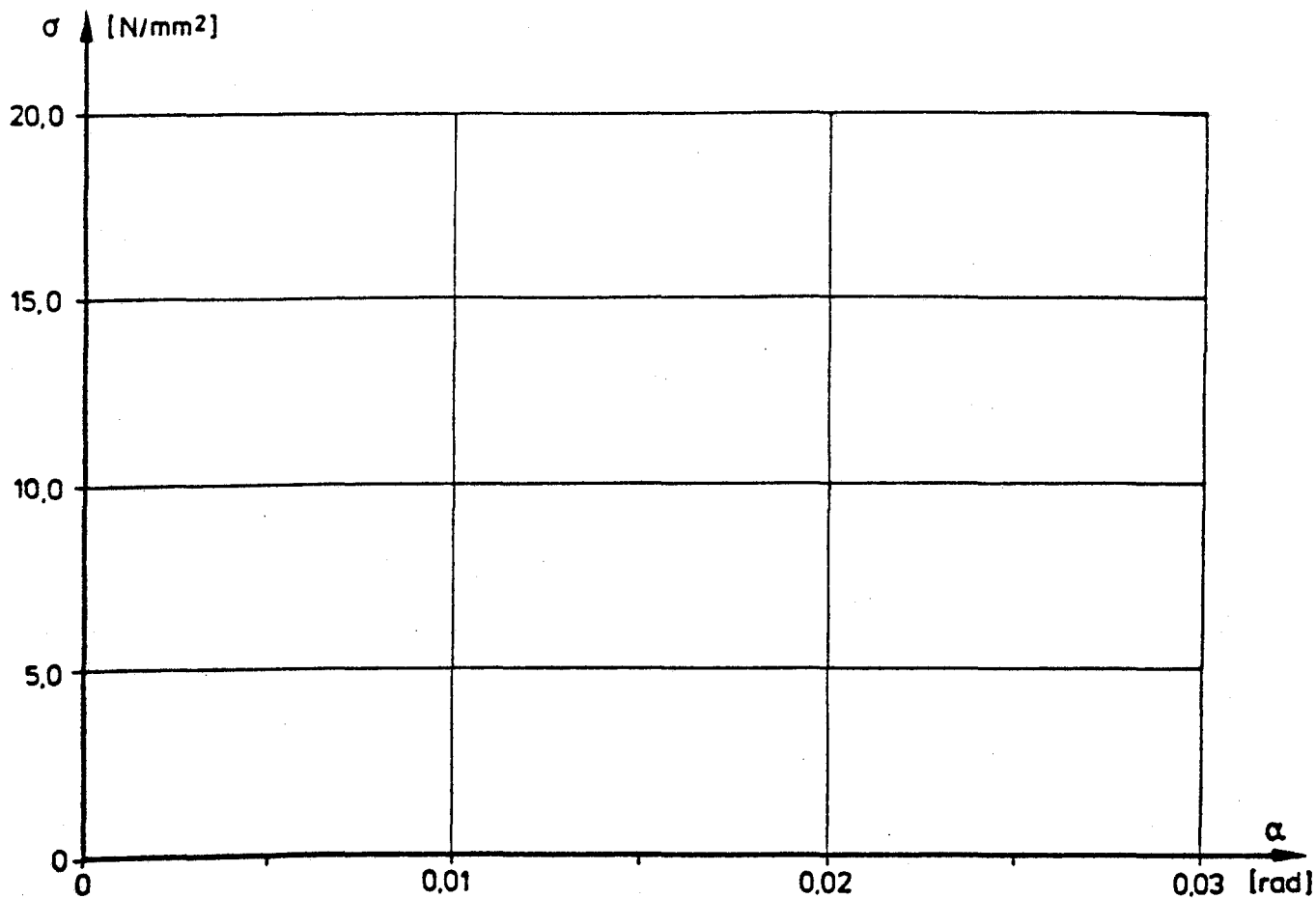
$a \times b \times d = 150 \times 200 \times 63 \text{ mm}$ ($t = 7 \times 6 = 42$)

B I L D : A 2 8 0



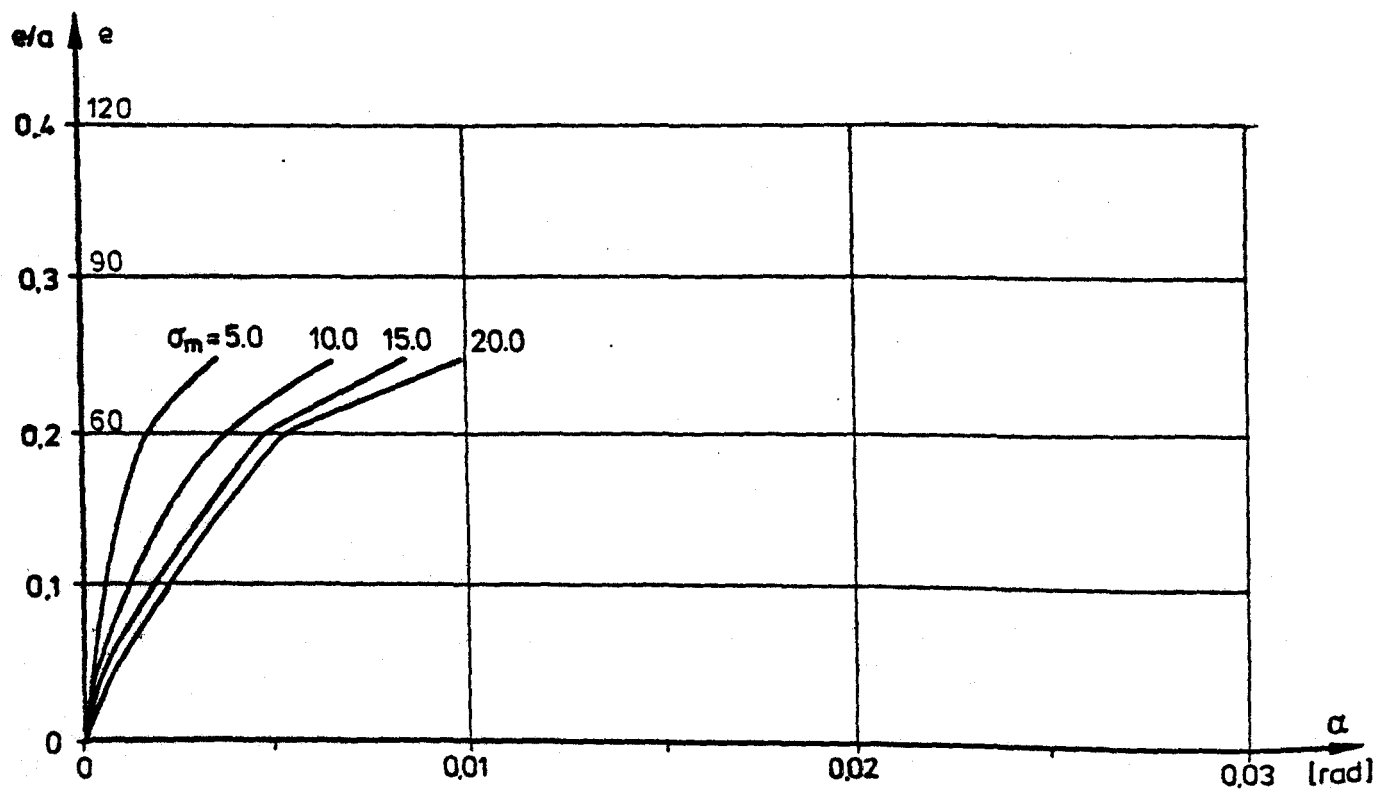
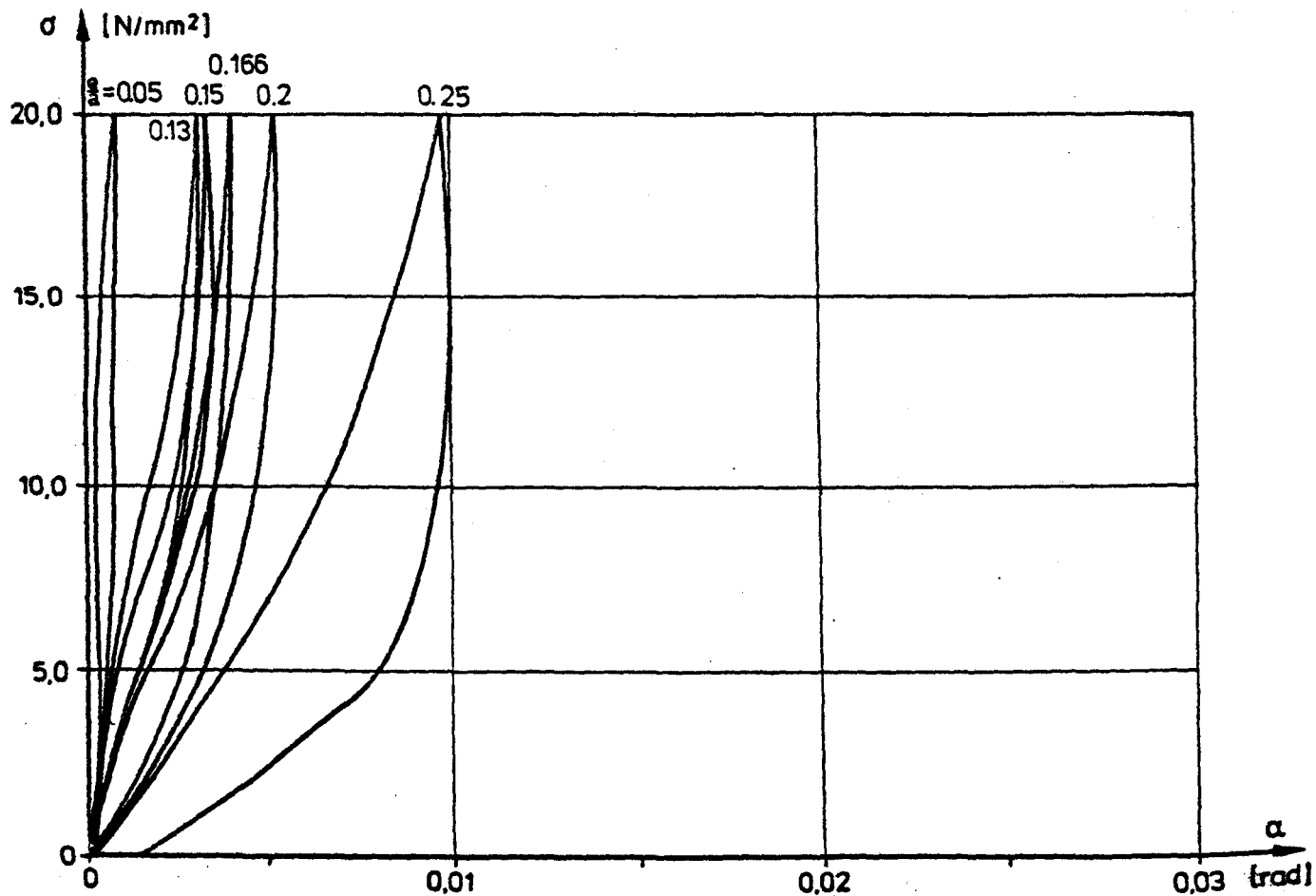
$a \times b \times d = 450 \times 350 \times 144 \text{ mm}$ ($t = 9 \times 11 = 99$)

B I L D : A 2 8 1



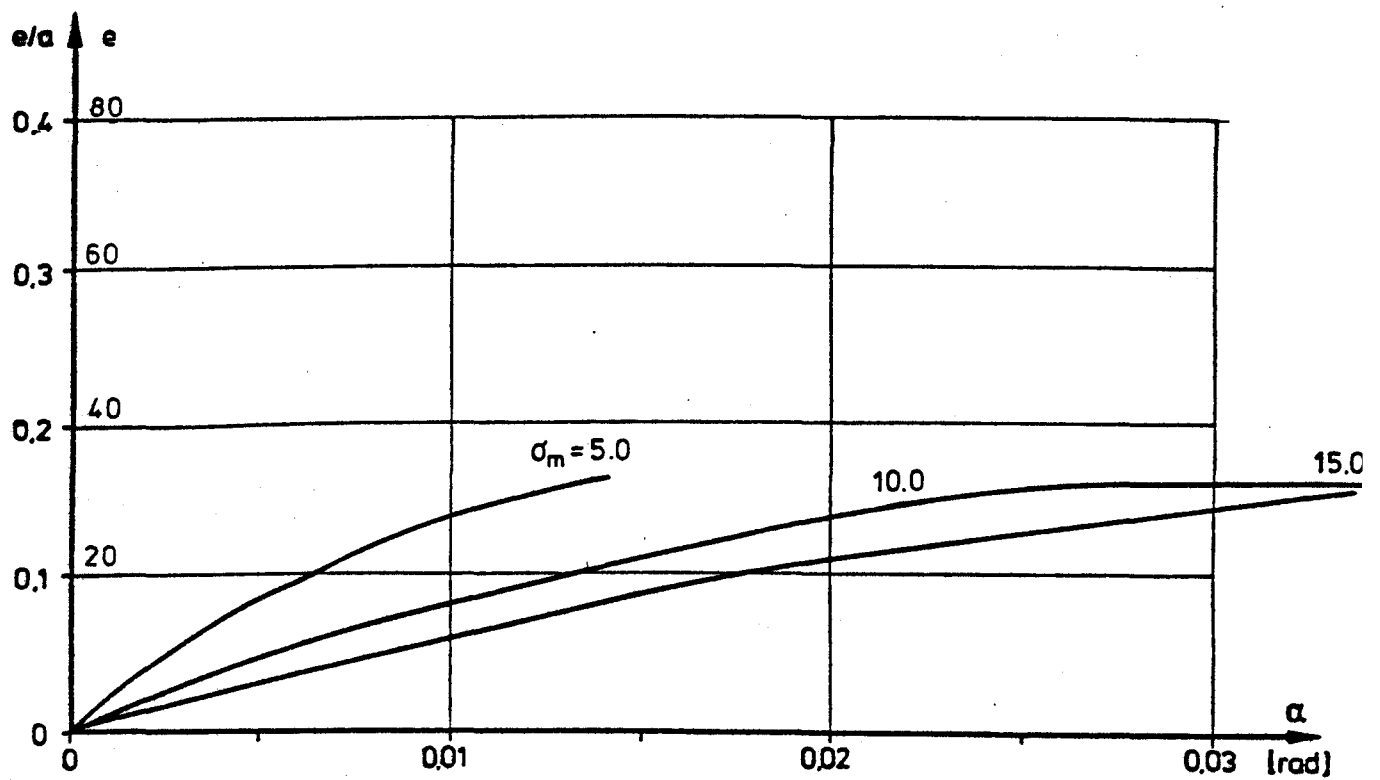
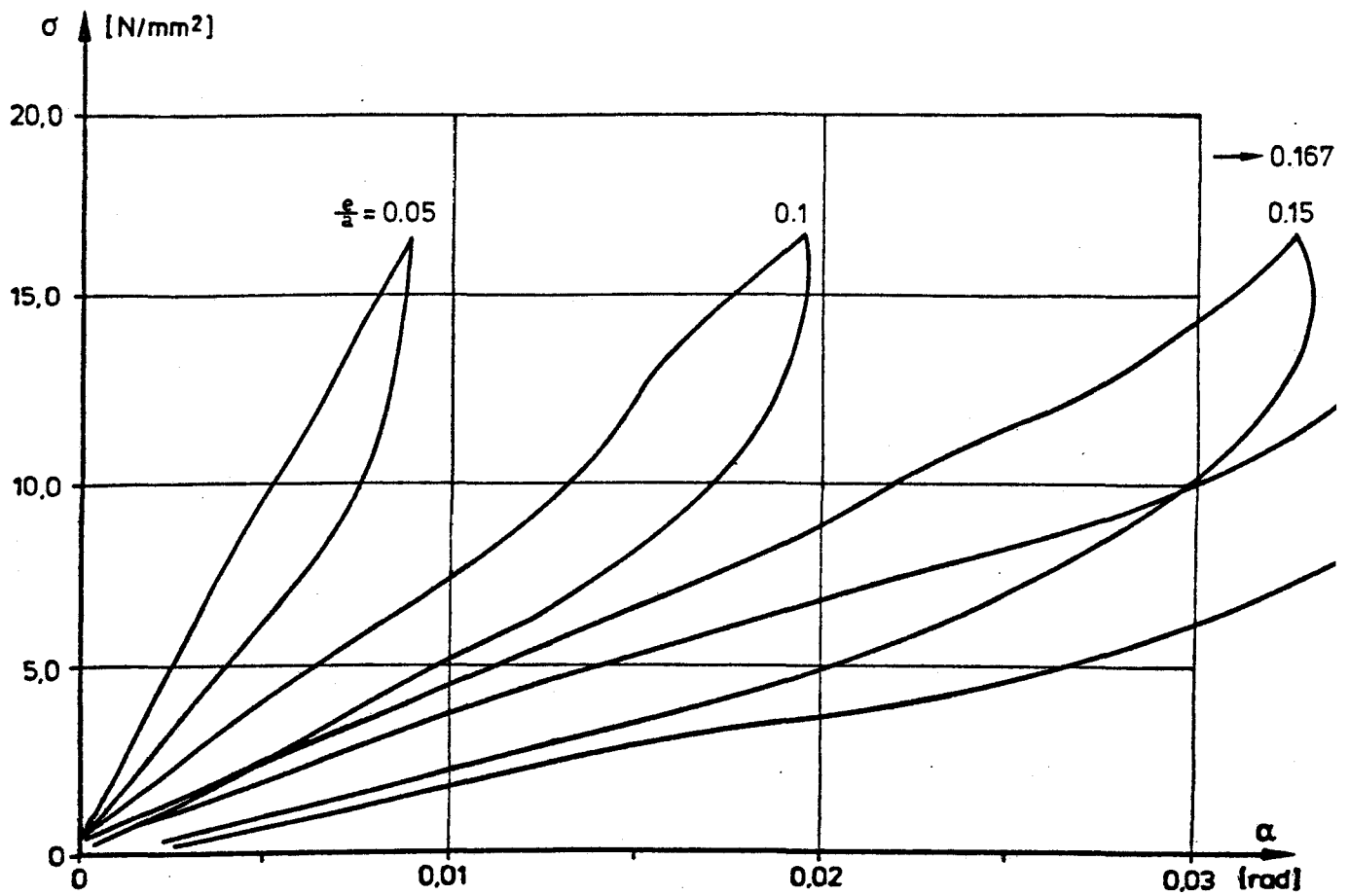
$a \times b \times d = 450 \times 350 \times 144 \text{ mm}$ ($t = 9 \times 11 = 99$)

B I L D : A 2 8 2



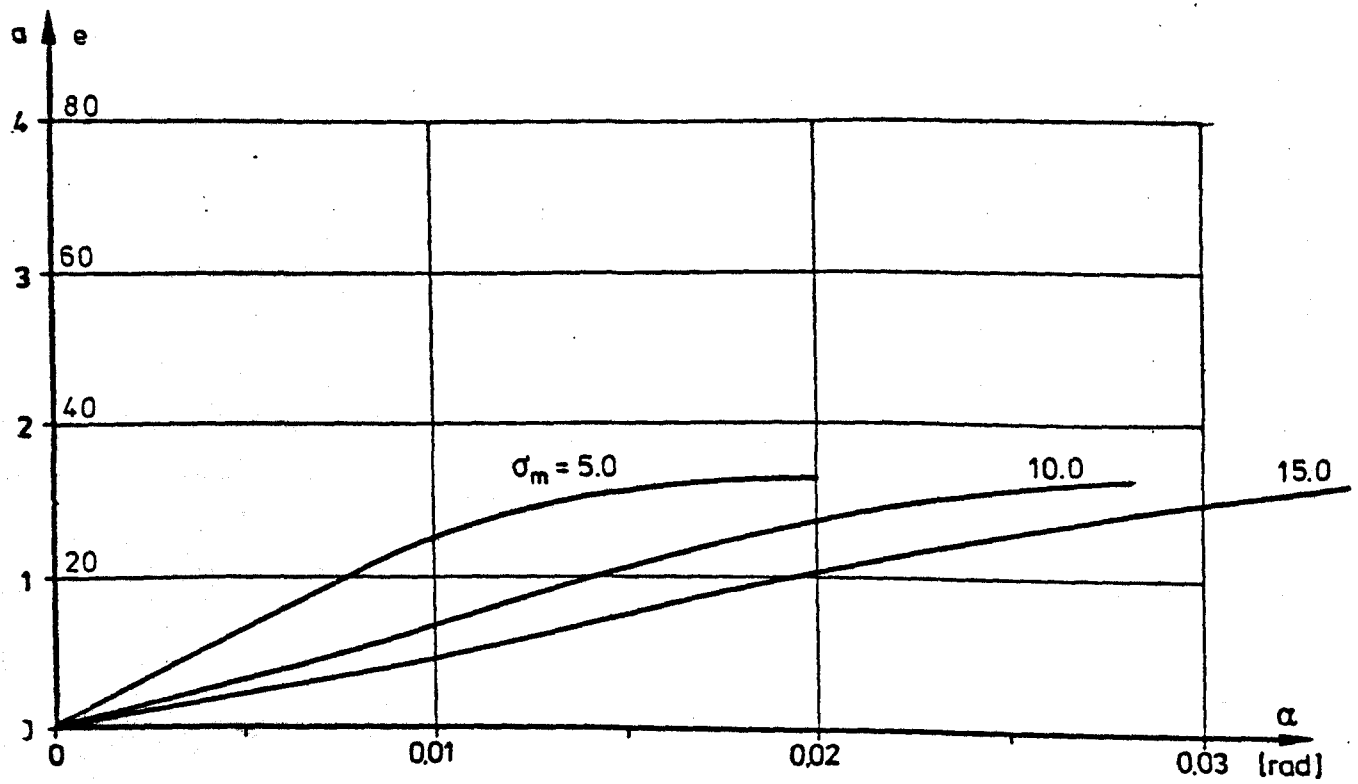
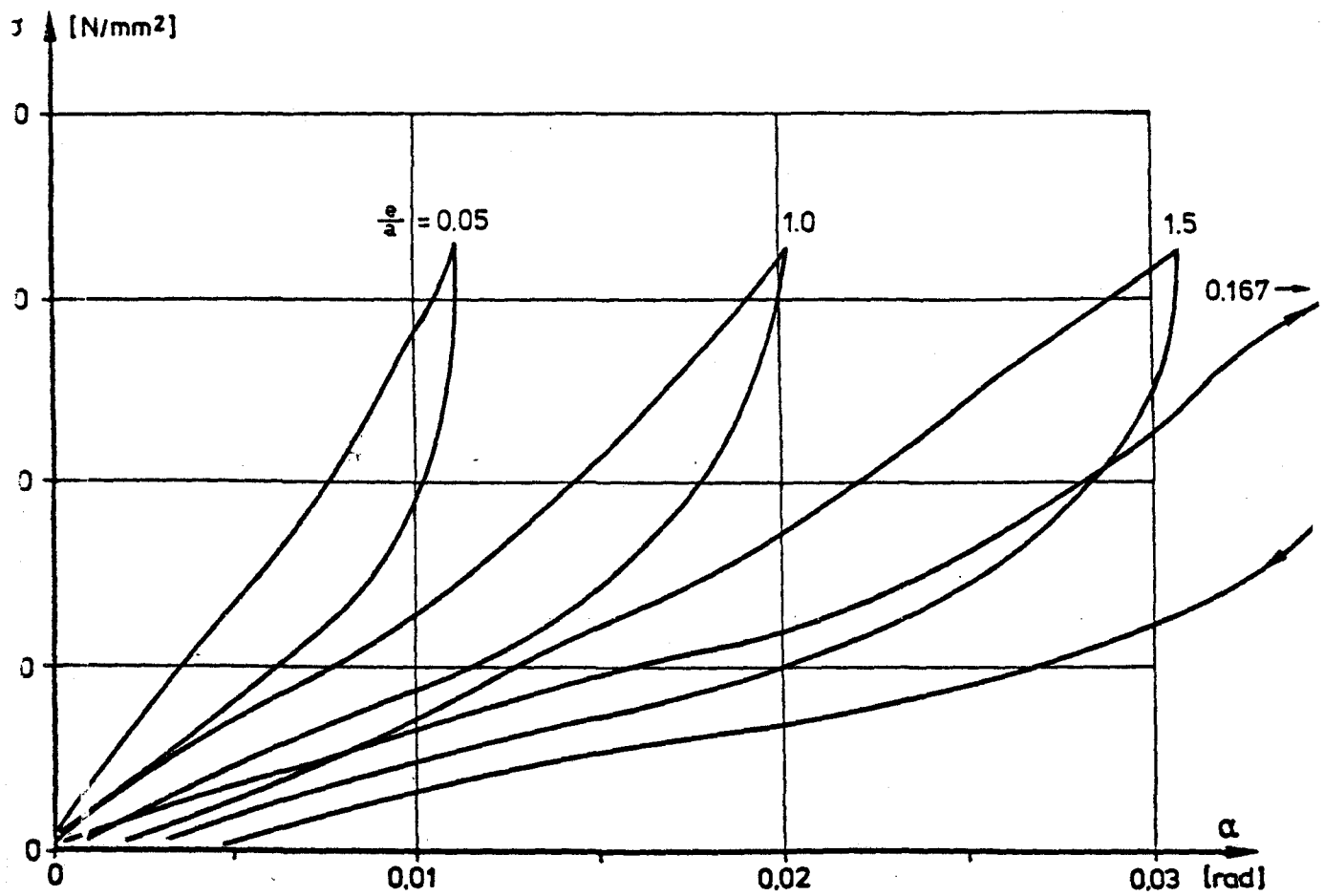
$a \times b \times d = 300 \times 200 \times 52 \text{ mm}$ ($t = 4 \times -8 = 32$)

B I L D : A 2 8 3



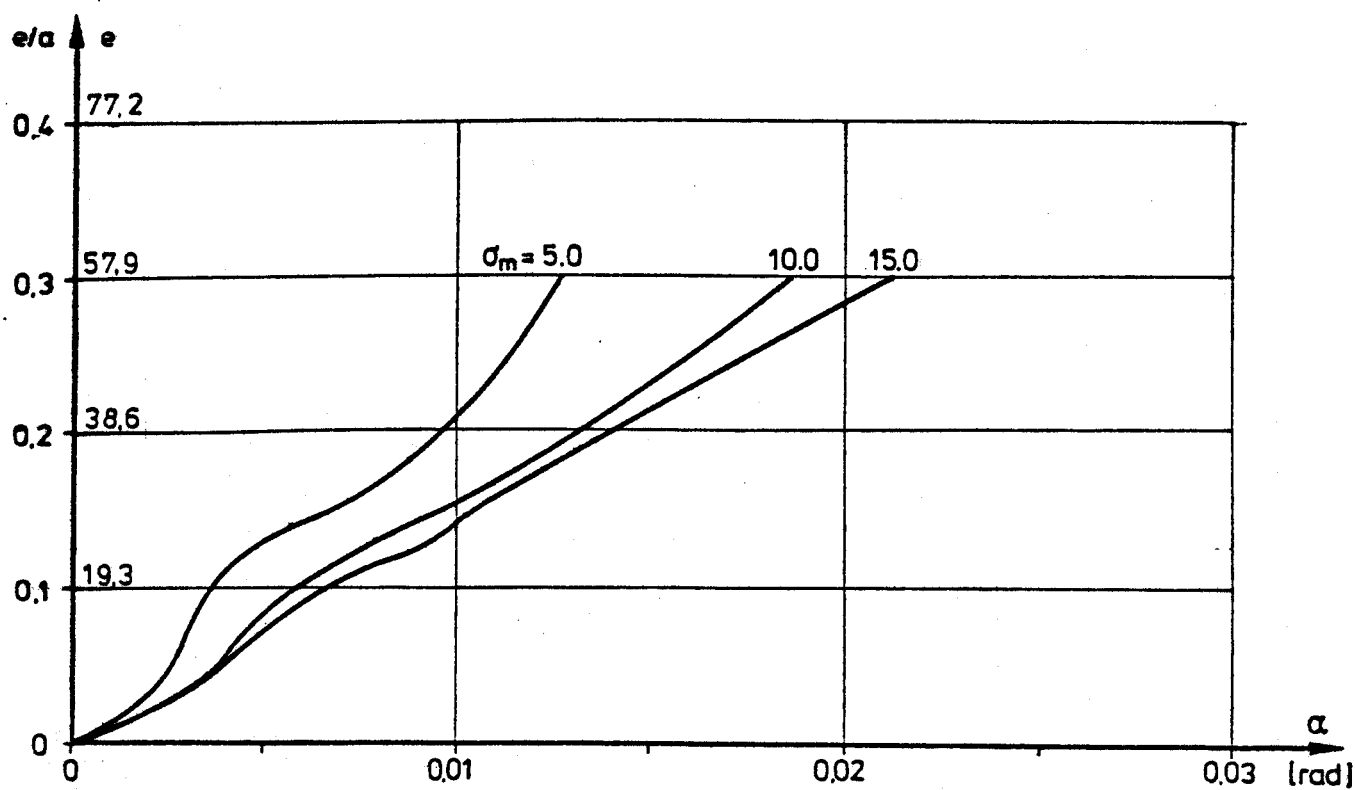
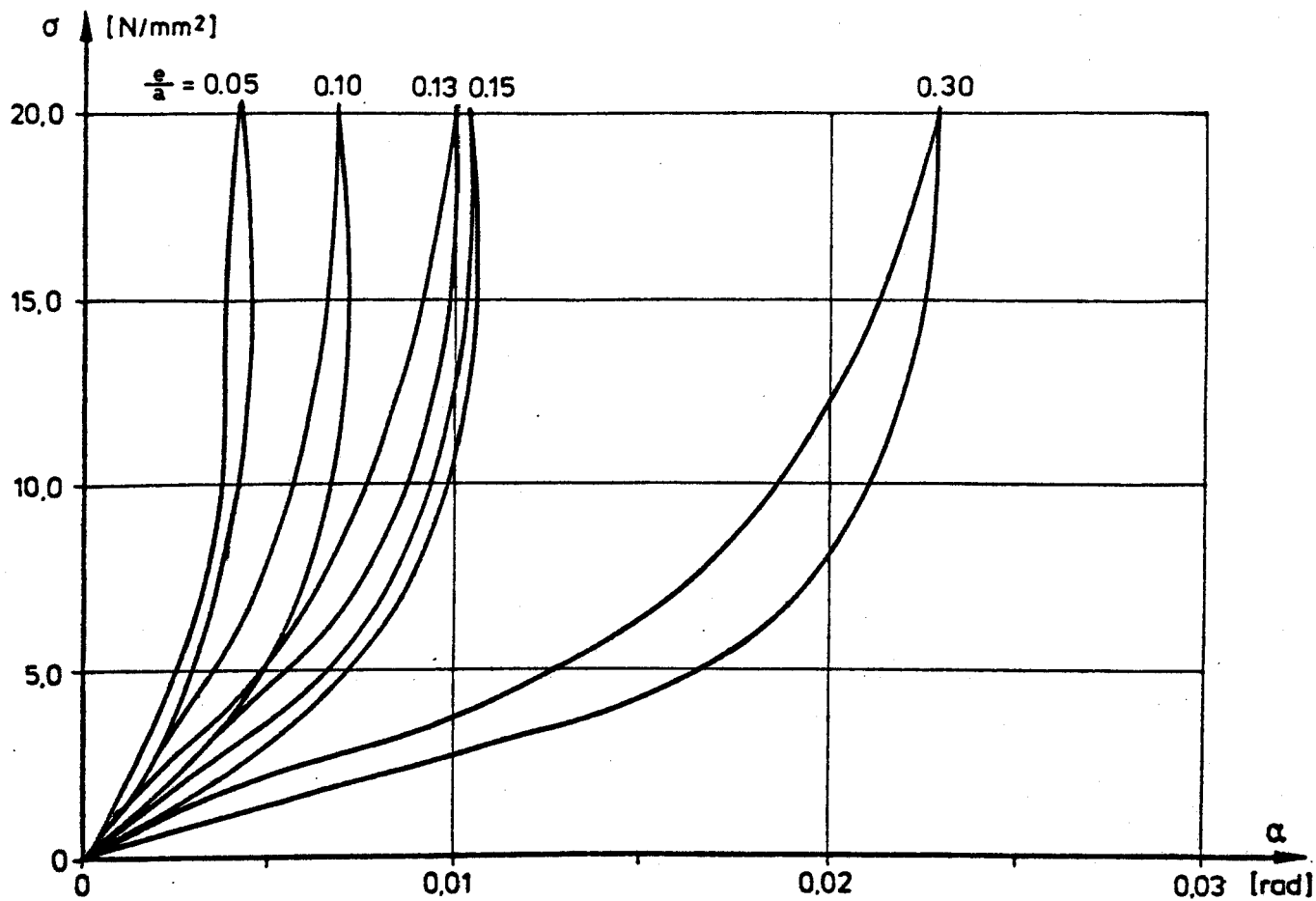
$a \times b \times d = 200 \times 300 \times 52 \text{ mm} \quad (t = 4 \times 8 = 32)$

B I L D : A 2 8 4



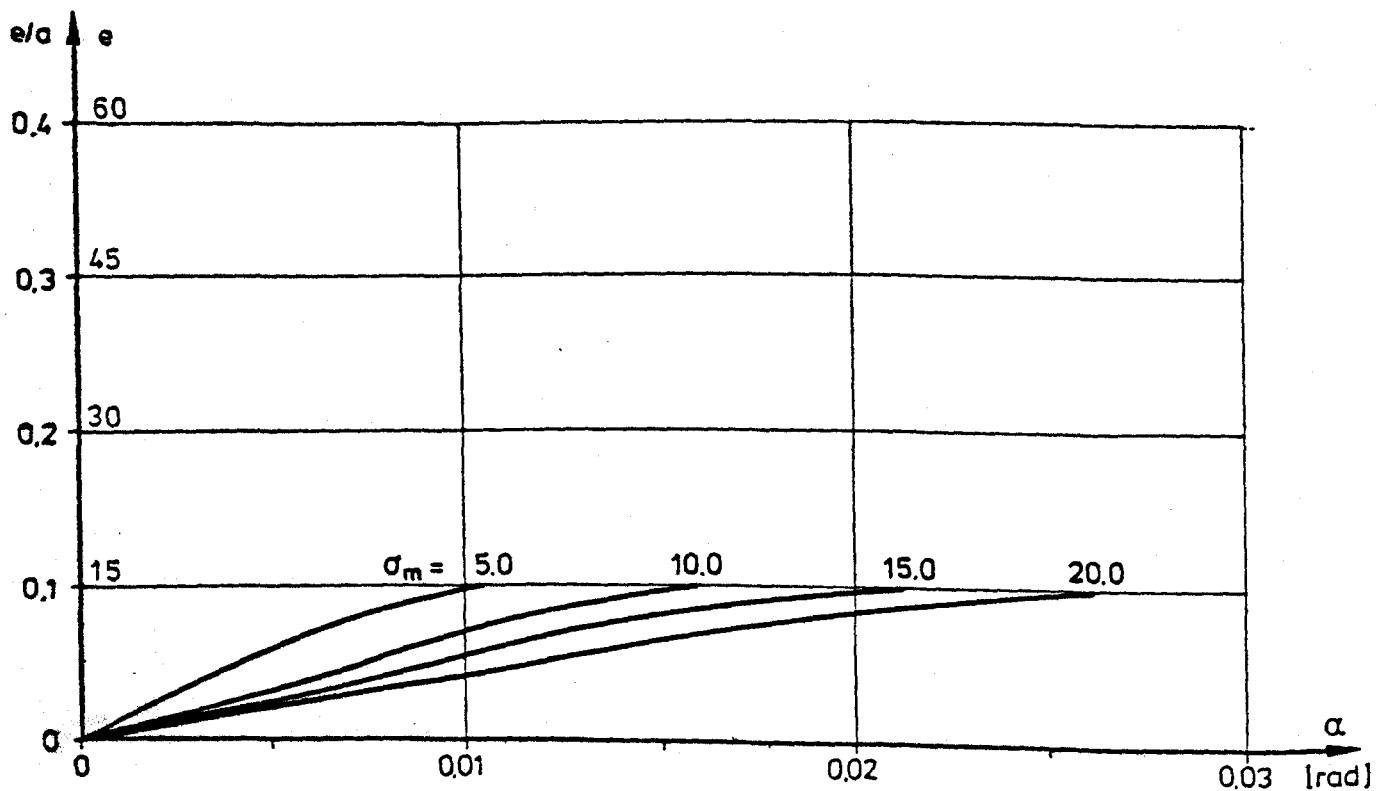
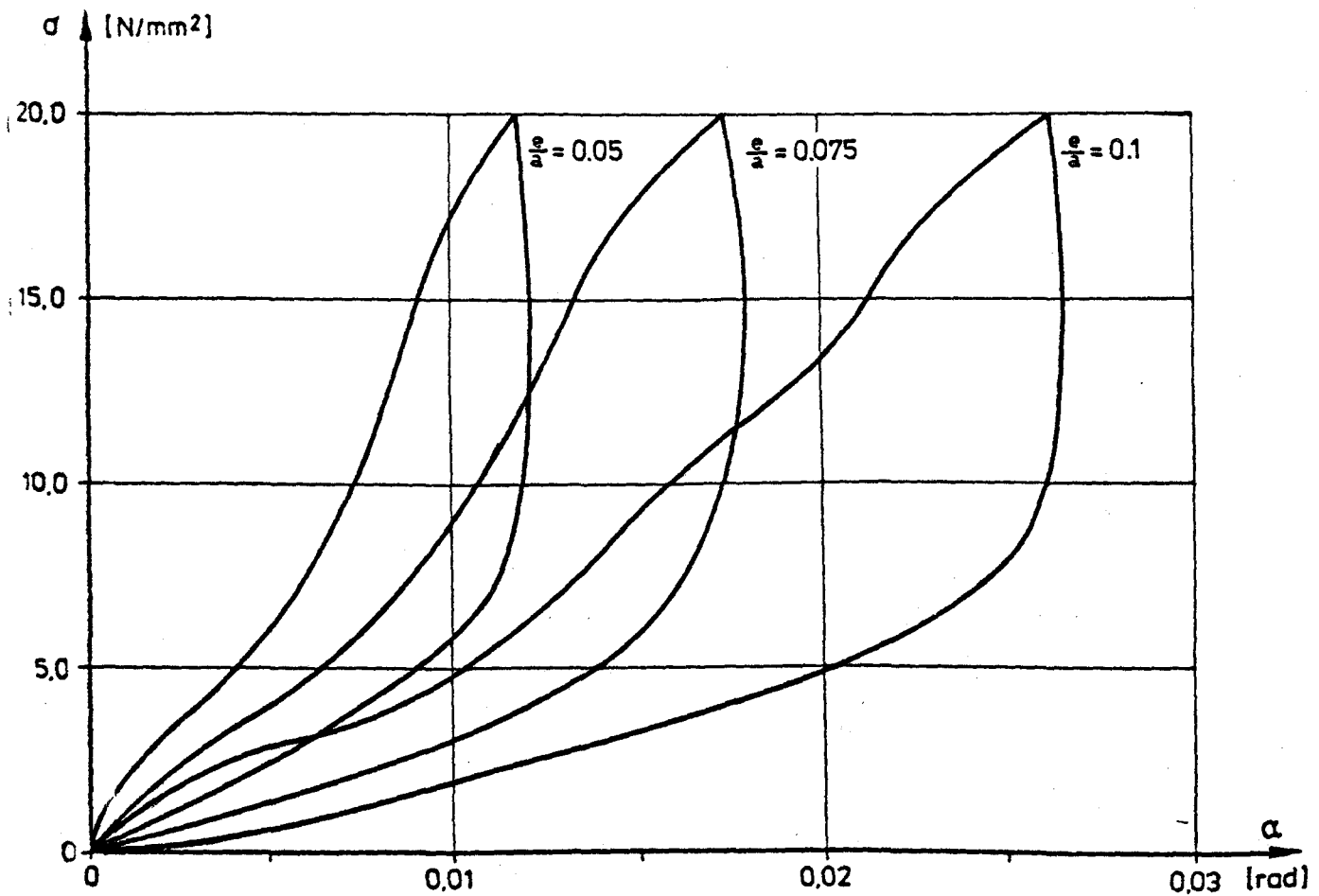
$a \times b \times d = 200 \times 300 \times 52$

BILD: A 285



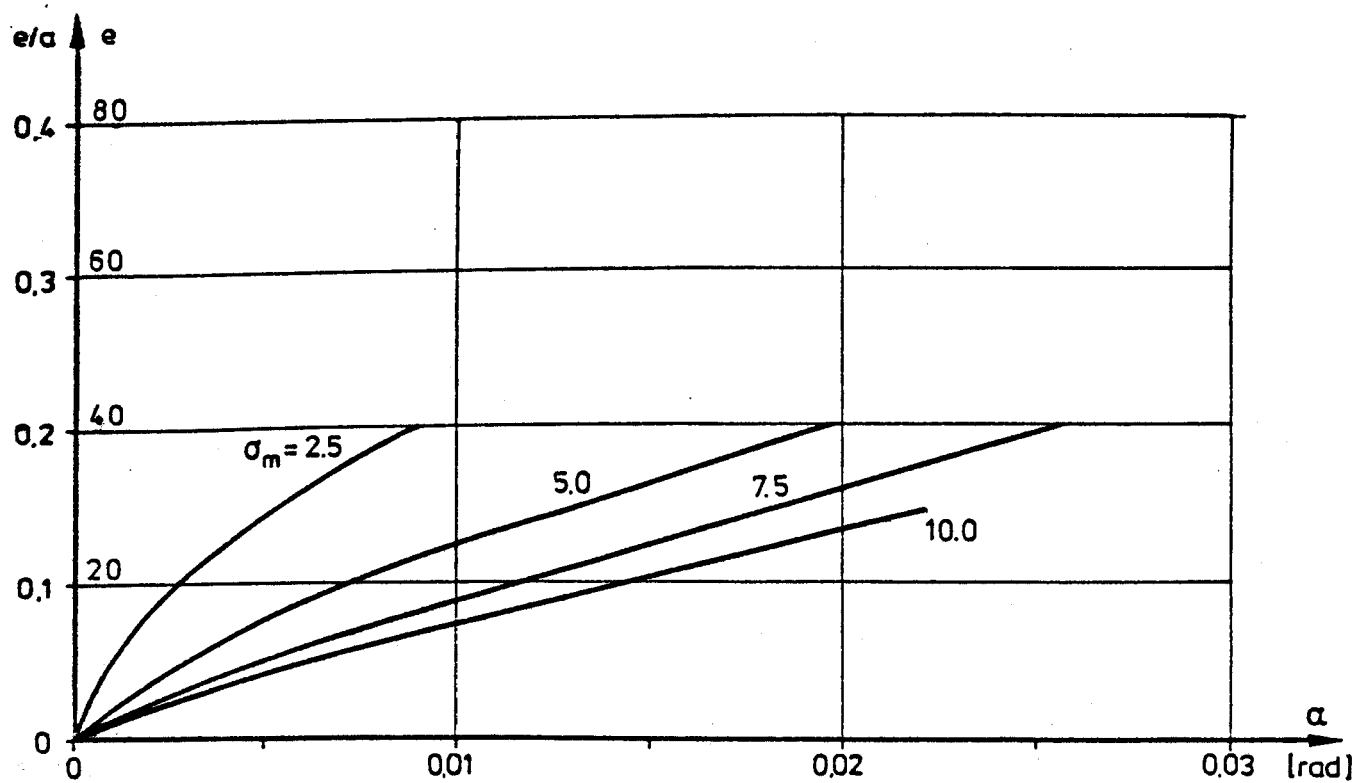
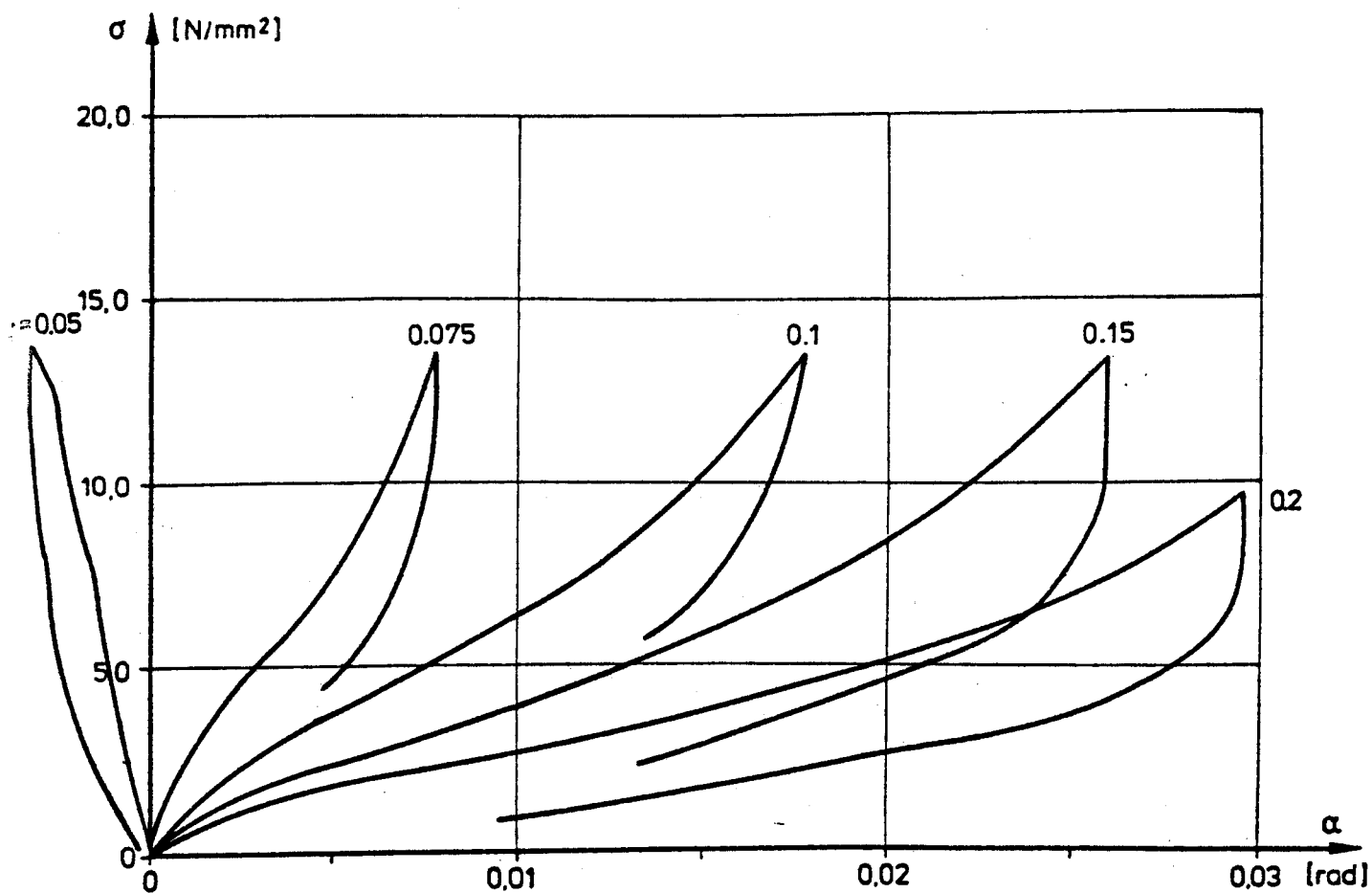
$a \times b \times d = 193 \times 300 \times 30 \text{ mm}$

B I L D : A 2 8 6



$a \times b \times d = 150 \times 200 \times 62 \text{ mm}$ ($t = 4 \times 10.5 = 42$)

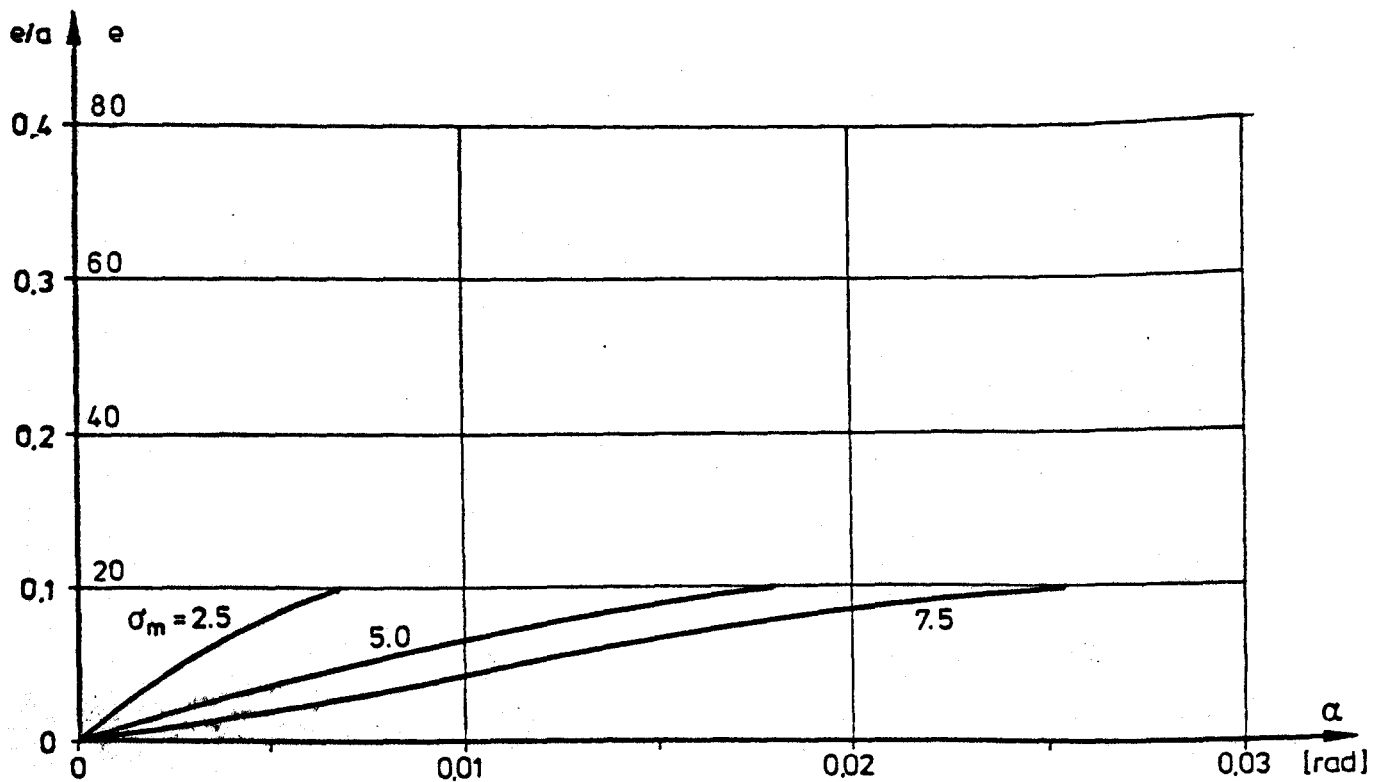
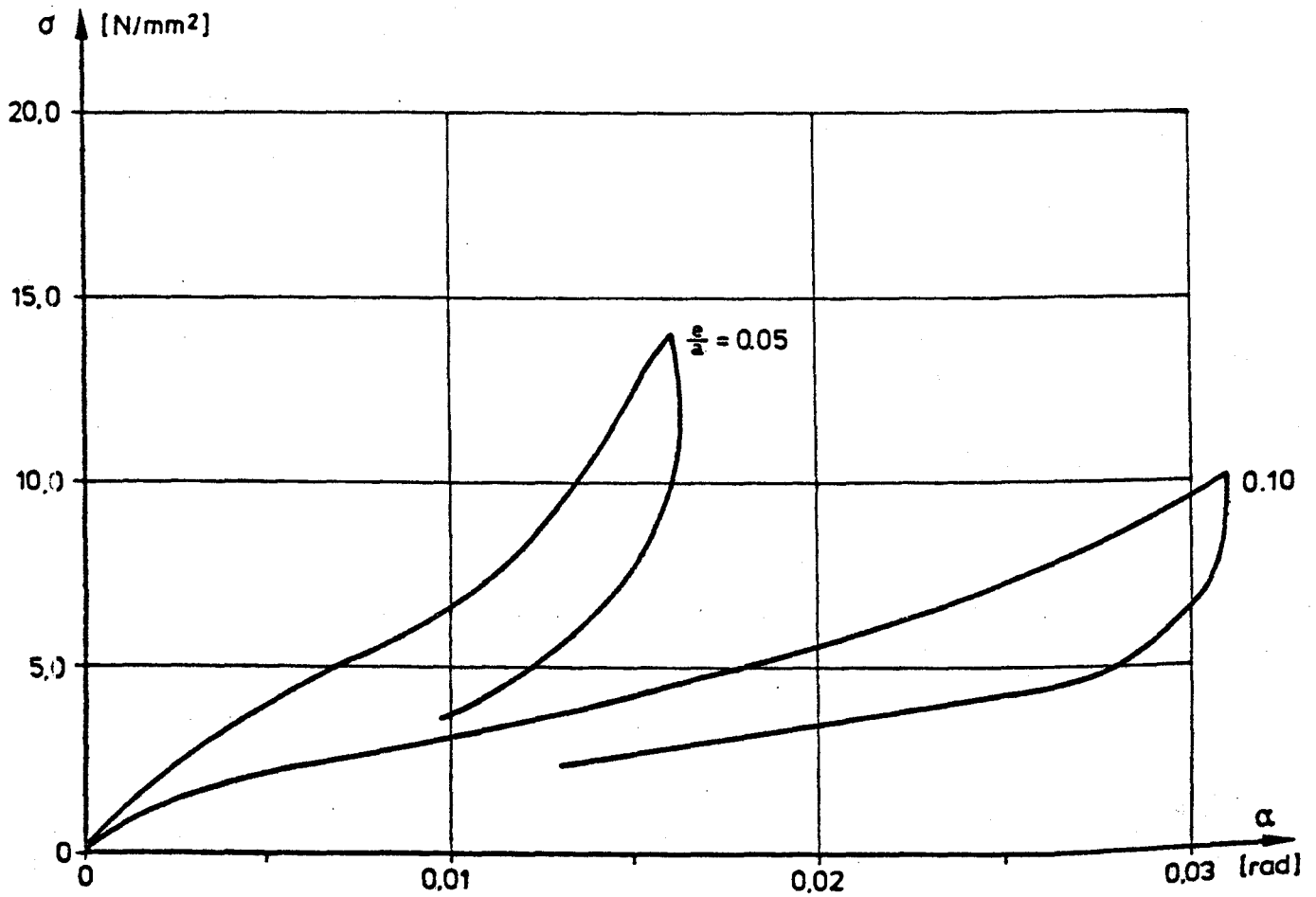
B I L D : A 2 8 7



kippweiche Lager

$a \times b \times d = 200 \times 300 \times 30 \text{ mm}$

B I L D : A 2 3 3



kippweiche Lager

$a \times b \times d = 200 \times 300 \times 30$ mm

B I L D : A 2 8 9